CHEERS
湛庐

Engineering A Beginner's Guide

人人都该懂的工程学

新核心素养系列  New Literacy

[英]
娜塔莎·麦卡锡 著
Natasha McCarthy

张焕香 宁博 徐一丹 译

从工程学的世界
看世界的工程
了解工程如何塑造
社会、文化与生活

浙江人民出版社
ZHEJIANG PEOPLE'S PUBLISHING HOUSE

版权信息

本书纸版由浙江人民出版社于2020年3月出版

作者授权湛庐文化（Cheers Publishing）作中国大陆（地区）电子版发行（限简体中文）

版权所有·侵权必究

书名：人人都该懂的工程学

著者：娜塔莎·麦卡锡

电子书定价：53.99元

Engineering: A Beginner's Guide by Natasha McCarthy

Copyright © Natasha McCarthy 2009

First Published in the United Kingdom by Oneworld Publications

All rights reserved

测一测

1．现代工程学科中，最古老的分支是？（单选题）

A．土木工程

B．结构工程

C．机械工程

D．化学工程

2．下面哪位画家同时也是非常著名的工程师？（单选题）

A．达·芬奇

B．拉斐尔

C．梵高

D．莫奈

3．下列哪所大学是第一所教授与现在工程学最相似的课程的大学？（单选题）

A．剑桥大学

B．巴黎综合理工大学

C．牛津大学

D．米兰理工大学

4．下面哪些学科属于工程学的分支学科？（多选题）

A．土木工程

B．结构工程

C．电气工程

D．机械工程

E．生物医学工程

5．下列哪个协会的成立，标志着机械工程成为一门独立的学科？（单选题）

A．英国机械工程师协会

B．美国机械工程师协会

C．英国土木工程师协会

D．美国电子与电气工程师协会



扫码下载湛庐阅读App，
搜索“人人都该懂的工程学”，
获取问题答案。

什么是工程学

什么是工程师？当你想象工程师时，脑海里会出现什么？是那个让困在车站的火车开动的人吗？还是那个修理不能排出污水的洗衣机的人呢？

或许这样的想象更恰当：工程师是设计和监造在车站蓄势待发的复杂机器零件的人，也有可能是设计和管理交通基础设施的人，而车站或铁路段只是其中的一部分。工程师可能是复杂水泵的设计者，可能是洗衣逻辑控制程序的设计者，也可能是设计和制造大型家电的企业管理者。

你甚至可以把工程师想象为电信或软件专家，他们举行的电话会议或虚拟讨论区让火车旅行变得多此一举；或者是化学工程师，通过某种方式彻底消除了洗衣服这种琐事。实际上，工程师仍在努力实现后者，但目前还只是一种希望。

工程学涵盖了一系列涉及范围极其广泛的活动。工程师负责汽车、电脑、电话和真空吸尘器等日常用品的设计、生产和维护，也负责航天飞机和肾透析机等非日常用品的设计和生产。他们还负责直观上根本不是物品的事物：公路和铁路系统、输送水电的管道和电线网络、支持移动电话的蜂窝网络，以及每天处理数百万笔金融交易的IT系统。从设计某种设备的最小部件到管理整个设计项目，再到监督施工现场和生产线，工程师的工作涉及诸多层面。虽然并不是所有被称为工程师的人都被这个行业认可为工程师，但“工程师”作为一个标签，其广泛性和多元性可能超越了“科学家”。

美发店的工程学

随时观察你周围的环境，想想你周围有多少物品是工程产物，你就能很容易地感受到，工程学无处不在。例如，我去的理发店。理发店可能是人们能想到的与工程领域最不相关的地方了（除非某些理发师喜欢自称为“发型工程师”），但如今的理发店完全依赖于工程产品。从最基本的方面来说，当代理发店需要供电，这不能没有电气工程；需要供水，这不能没有土木工程；需要锅炉来加热

水，这是由电气或燃气工程师设计的。吹风机是电气工程的产物，它配备了电动风扇和加热元件。当代理发师使用陶瓷涂层的造型工具，这种质地光滑的涂层是材料工程的产物，它能快速传导热量。目前人们支付许多服务费用时需要利用芯片和密码技术，支付理发费用也一样，读卡器读取信用卡里的芯片，判断输入的密码是否正确，然后将交易信息无线传输给银行，这是由现代通信工程和加密技术创造的奇迹。当然，理发店早在现代工程学诞生之前就已经存在了，但是如今的理发店完全离不开工程学的成就。

由于其广泛性，写一本工程学方面的书籍似乎是不太可能的。尤其是对于在工程学某一领域内工作（如废水处理领域），且对这一领域所有的细节和复杂性已了如指掌的工程师而言，用一本简短的书介绍工程学的“全部”可能是不可思议的。或许正因为我并不是专注于某一特定领域或某一项目的工程师，所以我不会摒弃这种整体思想！

本书从工程学以外的视角出发，从广义上看工程学，这或许只是泛泛而论，但其目的是捕捉工程实践对世界产生的巨大、广泛且包罗万象的影响。我希望以这种方式，来传达一个虽尚未涉足工程学的实质，但却与这一领域的从业者进行过合作的人对工程学的敬畏之心。

我的意图是，让非工程学领域的从业者从这本初学者指南中了解工程学在塑造生活方式、文化、社会、知识中所发挥的作用，让大家知道，工程学或许与科学和艺术一样，发挥着巨大的作用。我希望工程师阅读本书之后会对工程学的全貌有全新的、启发性的理解，并带着这种理解处理日常生活中的细节和局部问题。工程师十分关心自己的职业，我希望这本书能够传达出工程师对自己所从事的工作抱有的信念。

本书还有一个目的，那就是体现工程师和工程学在提高人们生活品质方面所起的至关重要的作用。例如，气候变化影响全球的每一个人，因而迫切需要采取措施以减缓其进程、减轻其影响，开发更清洁的能源生产方式，以更节能的方式进行供热、制冷、旅行、计算等基本活动。尽管世界各地的政治家们达成了减少碳排放的目标，并订立了应对气候变化的协议，但是将这些承诺和良好意愿变为现实方面发挥重要作用的是工程师。

下面的章节将带领大家领略工程产品的许多成就，了解工程学给我们居住的世界留下的印记，以及工程师对现在和未来产生的影响，无论是好是坏。本书不是对工程学的介绍，而是对基础工程实践的描述。相

反，本书试图概述工程学的特点——如果有的话。本书着眼于工程师面临的各种问题、工程学应对各种挑战的方法，以及工程学在通过不懈努力改善人们生活方式的过程中对人类知识做出的贡献。本书将歌颂常被忽视的工程成就，批判工程实践可能造成的损害，也将指出工程师未来面临的挑战。工程师将在解决世界面临的一些巨大挑战上扮演主要角色。

本书从社会学和哲学的角度出发，就工程师的角色和责任提出了许多问题，同时也回答了许多问题。我希望本书能为非工程师（还有非数学家和非物理学家）所用，向读者展示从工程学中可以学到的东西是多么丰富。

目 录

测一测
前言　什么是工程学
01　工程学的历史与发展
工程学的悠久历史
工程行业的出现
工程学与工程师
工程学与科学
工程学与其他技术
02　工程的世界与世界的工程
土木工程：创建城市，改变乡村
结构工程：更高、更轻、更强
机械工程：从火车到1000制动马力
电气工程与电子学：电力的普及化
信息与通信技术：策划一场新的革命
化学工程、材料科学与纳米技术
生物医学工程：成像、修复与监控
03　工程师的思维与方法：工程学的核心要素
发明、创新与制造：从概念到现实
科学、数学与计算：建模、预测、测试
工程设计：从需求到解决方案
系统和复杂性：涌现、不可预测性与人为因素
风险、不确定性与失败：把控未来
04　工程学与社会
工程学如何塑造社会
娱乐业中的工程学
社会如何塑造工程学
工程学中的伦理责任
遵守规范：工程师的道德准则
05　我“修”故我在：工程学与知识
工程学所必需的非技术知识
追求知识：支持科学发展的工程学
哲学工程：了解我们的思想
工程知识的独特之处
06　传承与发展：工程学的过去与未来

基础设施老化
工程能力
能源挑战
调节气候
结论：工程学的局限性？
注释
推荐阅读书目
参考书目
致谢

A ENGINEERING BEGINNER'S GUIDE



工程学的历史与发展

工程行业是如何出现的？

工程师具有哪些职业特点？

工程学与其他学科的区别是什么？

有些活动与其在古代的“前身”有着清晰的联系，数学就是一个例子。无论从古时起数学的发展有多快，用数字或其他抽象手段处理数量和比率的活动，在今天都算作数学。哲学也是如此，任何一个人，无论是像苏格拉底那样在市集上漫步，还是独自坐在浴桶中，只要他一天中的大部分时间都在认真思考生命的意义以及如何生活，就可以算是哲学家了。不管由此产生的哲学是多么幼稚和无趣，它仍然在原始哲学中占有一席之地。

工程学没有如此清晰的联系。显而易见的是，早在直立人开始建造住所时，与工程有着类似目的和用途的活动就已经存在了。我们可以把首次使用燧石进行切割或生火的活动视为早期工程的范例，但是把石器时代的工具制造者算作工程师是否合适呢？我们现在将工程行业和手工艺行业视为两个不同的行业，但这并不是完全准确的，毕竟并非每一个会使用工具的人都可以算作工程师。在家居装饰中，无论电动工具多么精巧，这种活动本身都是不足以纳入工程范畴的。孩子用梨的数量减去苹果的数量，虽然与教授在办公室里进行的验证迥然不同，但我们也称之为数学。然而，我们不会把业余的建筑工作称为工程。

那么，真正的工程是什么时候出现的呢？关于工程的来历有很多种说法，而且所有的争议点都聚焦在工程师的准确定义上。

工程学的悠久历史

演绎工程学历史的一种方法是，通过现在人们认为与工程十分类似的活动来追溯工程学。这些活动与工程存在相似之处是出于种种原因。比如说，虽然现代的建筑与埃及金字塔大不相同，如今也没有工程师从事类似建造金字塔的工程项目，但是建造金字塔这样宏伟的建筑不仅需要运用数学来创建物理结构，还需要复杂且大规模的人力和资源，而这两点正是现代工程的特征。不过，埃及金字塔与现代工程项目还是有所不同的，现代工程项目重在实现一些有益的目的，以便为人类服务，提高人类的生活质量；金字塔虽然令人印象深刻，但追求的是一种超世俗的目的，这在现代工程中非常罕见。

古希腊的许多活动似乎是“工程科学”的前身，工程科学研究人造建筑和机器背后的数学和物理原理。例如，阿基米德对杠杆的工作原理进行了分析，他对自己的分析充满了信心，并坚信可以利用这一原理来撬

动地球。然而，古希腊人并不擅长亲身实践，他们更愿意坐下来思考支点和滑轮的本质，因此，把古希腊人的活动称为应用数学比称为工程学更恰当。罗马人比希腊人做得更好。他们关注更为实际的问题，例如建造高架桥和污水处理系统。虽然罗马人的活动没有像现代工程活动那样运用大量的数学原理，但也确实应该被称为某种工程，即使只是相当初级的工程。

中世纪的活动与现代工程有着密切的联系。中世纪欧洲的人们建造了各种各样的建筑，巨大的拱顶大教堂使用飞拱等装置，巧妙地将支撑结构融入装饰中，这些建筑可以与雄心勃勃的结构工程项目相提并论。虽然人们将建造这些建筑的工匠描述为建筑大师，认为他们可能类似于现代建筑师，但他们的工作的确包含了工程任务。毕竟，如果没有技术娴熟的结构工程师参与的话，如今人们不会放心地把如此宏伟的建筑项目托付给建筑师和建筑工人。

与此同时，伊斯兰黄金时代带来了机械发明的巨大飞跃。这一时期的核心人物是阿尔 - 贾扎里（Al-Jazari），他是一位发明家，也是一位工匠，他在《精巧机械装置的知识》（*Book of Ingenious Mechanical Devices*）中展示了自己毕生的作品。其中的一些机械设备虽历经数个世纪，但对机械工程仍至关重要，如抽水泵，以及如自动洗手机等复杂的稀奇装置。

在这些时期里，一定有一些活动是现代工程师作业的前兆，但是由于许多活动在很多方面都与工程相似，所以很难通过人们所做的工作来描述工程学的历史。物理学家和化学家的工作在某些方面与工程类似，但我们不会称他们为工程师，因此，通过“engineer”（工程师）这一词的词源追溯工程学，看看这个学科最初是何时得名的，是一件很有趣的事。

“engineer”这个词通常被认为起源于拉丁语的“ingenium”或“ingeniatorum”。意义分别为“独创性”和“拥有或运用独创性的人”。当然，这也是英语单词“ingenious”的词根，意为“有创造力的、新颖的”，这意味着工程学的核心概念是独创性和创造性。在中世纪，在军队中与石弩或其他战争装置打交道的工匠被称为“ingeniator”。这个称谓一直沿用至文艺复兴时期，达·芬奇在其职业生涯中，曾一度自豪地拥有“ingeniarius ducalis”（公爵的工程师）的称号。那么这个称号是否表明他是现代意义上的工程师呢？达·芬奇的工作的确包含了工程活动，工程师们也常热衷于称他为他们中的一员，但是达·芬奇被称

为“ingeniarius”的原因与人们今天称某人为工程师的标准略有不同。

“ingenium”这个词也是英语单词“engine”（发动机）的词根。由此我们认为，工程师之所以被称为工程师，可能是因为他们与发动机打交道。但中世纪的“ingeniator”当然不会与蒸汽机或内燃机等现代工程机械打交道。在中世纪和近代早期，“ingeniator”之所以得此称呼，是因为他们在军队工作，与战争“发动机”打交道，这些战争“发动机”是包括石弩、大炮在内的所有早期战争技术装置，“ingeniator”负责设计、制造和维护这些装置。事实上，达·芬奇的工程工作主要是设计枪炮和其他轰炸物的设计上，在文艺复兴时期，这些是在围攻战中取胜所必不可少的武器。因此，“ingeniator”的工作主要涉及军事，而不是一般的工程。

英语单词“engineer”是通过法语词“ingénieur”直接引入英语中的。在法语中，这个词最初同样用于战争。法国军队中的“ingénieur”仍然是那些处理和维护战争武器的军人。但是在法国军队中，他们的地位比前辈们要高得多。1676年，这些“ingénieur”组成了“精灵军团”（corps du génie），这是一群在军事建设方面受过特殊训练的士兵，他们制造战争武器的技艺，建造军事所需的基础设施，包括道路、防御工事等。同样，“ingénieur”这个词表示军队中具有特定技艺和能力的成员。

如今，“engineer”这个词所指的范围更广，不仅仅局限于那些在军队中工作的人了。因此，根据“engineer”这个名称来追溯工程学的历史有一定的局限性，因为它没有告诉我们，我们现在称之为“工程学”的这个范围广泛的学科是何时兴起的。然而，不可否认的是，军事活动在塑造现代工程师方面发挥了重要作用，这一点从工程教育和培训的历史中可以看到。

列奥纳多·达·芬奇

列奥纳多·达·芬奇是一位非凡的画家。他的名字和作品可能是西方世界中最著名的。然而，这位文艺复兴时期的能人涉猎广泛，甚至可以说是精通各种学科，其中就包括工程学。达·芬奇自称为工程师。有证据表明，他在一封介绍信中详细阐述了自己的工程技能，其中军事工程技能尤为突出，如设计石弩和大炮，研发锻造金属的方法，从而用新方法制造攻击力更强的大炮。当然，达·芬奇还从事桥梁设计、城镇规划，研究河道治理的水力学，以及建造用于大型活动的自动娱乐装置等。众所周知，达·芬奇设计了飞行器和直升机。有证据表明，他甚至试飞过飞行器和直升机，但没有成功。

达·芬奇在笔记中记录了他对工程学的想法和看法，但这些笔记残缺不全，他的很多想法似乎也同样不完整。因此，他没有像伽利略那样对工程学历史产生影响。有些人甚至认为他只是一个相当普通的工程师，因为他的工作在同行或前辈们中没有创举。[1] 之所以会这样，也许是因为，与达·芬奇在绘画领域的天赋相比，他在工程领域的表现太平常了，他的绘画生涯使他在工程方面的努力黯然失色。又或许是因为，现代技术的发展，特别是飞机、直升机和潜艇，完全超越了达·芬奇在工程学领域所做的所有工作，但是艺术上的任何发展（如果有的话）永远也无法将《蒙娜丽莎》贬为一幅粗糙、低劣的画作。

不管出于什么原因，《蒙娜丽莎》才是达·芬奇流传于世的遗产，想想他是否会对此感到惊讶甚至失望，也是很有趣的。当然，值得注意的是，当今人们对工程师及其地位的看法与文艺复兴时期是不同的。如今，人们认为成为一名成功的艺术家是崇高和引人注目的，而成为一名工程师则被认为相对逊色。然而在达·芬奇的时代，制造和想象技术性的装置与创造精美的艺术一样崇高。

工程学诞生于17世纪后期的法国军队，成为一种特殊的专业，有专门的培训和教育模式。“精灵军团”中的士兵们在训练营接受专门的军事技术培训。“精灵军团”成立于1676年，30年后，路桥军团（corps des ponts et chaussées）随之成立，路桥军团着重建造军队和平民都需要的基础设施。1747年，一所专门培养土木工程专业学生的学校成立，即法国国立路桥学校（École Royale des Ponts et Chaussées），这所学校现在仍在招收学生（现在名为École des Ponts ParisTech，简称ENPC）。然而，巴黎综合理工大学（École Polytechnique）才是第一所教授与如今的工程学最为相似的课程的学校，巴黎综合理工大学成立于1794年，当时名为“中央公共工程学院”（École Centrale des Travaux Publics）。

法国的工程教育远远领先于世界其他国家。法国是当时唯一一个避开日常的工程工作，条理化地教授工程学的国家。美国很快就赶上了法国，西点军校成立后，工程学校就从军事训练学校中发展出来。西点军校成立几年后，开始采用法国军事工程学校的课程。到19世纪30年代，许多成功的工程学校在美国发展起来，它们教授同样的课程。

英国的进展比较缓慢。在整个18世纪，英国都没有对军事或民用领域的工程师进行专门培训。大部分工程师是通过学徒期间观察并协助技

艺娴熟的工程师而得到锻炼的，只有少数工程师是在大学毕业后接受在职培训的。像托马斯·特尔福德（Thomas Telford）和瓦特等著名工程师最初都是从学徒做起，后来成为工匠。他们学习的是实用技能而非理论知识。尽管他们受过手工训练，但他们的角色却是工程师。他们参与设计，为客户进行规划，并与他人签订合同，由他人实际操作，而不是自己亲自动手。约翰·斯密顿（John Smeaton，1724—1792）是英国最早以这种方式工作的工程师之一，也是他在1768年撰写的一份报告中首次称自己为“土木工程师”。

一旦我们接触到斯密顿，我们就到了历史上的一个转折点，在这个点上，我们可以毫无争议地将某个人视为不在军队工作的现代工程师。然而，上述的历史表明，到达这一转折点有许多不同的路径，而且在这些路径的许多节点上，人们认为工程学可能已经出现了。这些历史描述也表明，复述工程学历史是一件困难的事情，工程学并不是在历史的某个特定时间点上体系完善地出现的，而是在很长的一个时期里发展起来的。在这一时期的不同时间点上，在世界上的不同地方可以发现接近现代工程的活动，也可以发现接近现代工程师的人，但这一独特学科的出现却经历了一段时间。

工程行业的出现

工程学经历了漫长的发展过程后，进入了快速的自我组织阶段。随着工程活动越来越密集，工程师也越来越雄心勃勃。他们觉得有必要确立自己的职业地位，形成一个得到公众认可的行业。这个行业要有成员共享的知识体系，通常涉及特定的培训或资格，并要求其成员遵循共同的工作标准和公认的道德准则。法国和美国工程教育的兴起对工程学成为一个专业至关重要，但另一个重要的里程碑则是成立了专业的工程团体。

由于英国缺乏正规的工程师教育体系，一些年轻的工程师需要信息资源和教育资源来支撑他们的职业发展。出于这种需求，亨利·帕尔默（Henry Palmer）于1818年1月2日在伦敦舰队街的肯德尔咖啡馆组织了一次会议。帕尔默在开幕词中提出了以下观点：

> 就像两个外国人之间的翻译必须理解两者的语言一样，工程师作为哲学家和技工之间的媒介，必须同时拥有实践知识和理论知识。

这阐明了正在萌芽的工程行业的特性，那就是工程行业不仅仅是工匠或工人的手工劳动，但又与纯科学不同，它与工匠的实际工作直接相关。这个新领域需要一个组织机构，英国的土木工程师协会（Institution of Civil Engineers，简称ICE）是第一个承担这一角色的组织。协会由一群年轻人发起，旨在为工程师提供接受指导和引领的机会。为了实现这一目标，他们愿意分享自己的经验和专业知识。该组织任命托马斯·特尔福德为首任主席。

特尔福德是一位享有很高声誉和影响力的工程师，他的一生都在修建公路、运河和桥梁，他最著名的作品是喀里多尼亚运河和梅奈悬索桥，喀里多尼亚运河开辟了一条从因弗内斯到威廉堡的横跨整个苏格兰的通航路线。特尔福德把他的图书馆捐赠给了土木工程师协会，同时该协会还可以借助他的声誉和丰富的经验。

在特尔福德的领导下，土木工程师协会成了一个具有重要意义的机构。该协会成了一个范例，很快就被其他地区竞相效仿。在美国，第一个专业的工程师机构是1848年成立的波士顿土木工程师协会，随后是1852年成立的美国土木工程师协会，类似的专业组织现在已在世界范围内建立起来，但由于一些国家管控着“工程师”的职称，因此所有人都必须在相关专业机构注册后才能成为工程师。

土木工程师协会的创立不仅为全世界类似机构的建立注入了动力，而且还引发了工程协会数量的急剧增长，这些协会代表着更新颖、更专业的工程领域。1846年，英国机械工程师协会成立，首次与土木工程师协会分开。他们之所以选择走自己的路，部分原因在于他们觉得机械工程师与土木工程师截然不同。担任顾问的土木工程师会花时间制订计划、进行实地访问，以确定一切都将按计划进行，而机械工程师更多的是在机车车厢里亲自动手实践。因此，机械工程师创立了自己的协会，更精准地服务于自己的需求。这个过程不断重复，在最初区分了土木工程和军事工程之后，工程师们还在或详或略的层面上进行了很多的划分。

世界各地都遵循着这一模式，成立了专门的工程团体，代表团体成员的利益，并制定实践和道德准则。工程行业的出现以及专业团体的组成，使工程学与医学和法律等其他行业处于同等的地位。这反映了一个事实，那就是工程学需要专业知识和技能，这样工程师才能顺利工作。工程学在社会中起着核心作用，它有责任为广大的公众服务。

伊桑巴德·金德姆·布鲁内尔

伊桑巴德·金德姆·布鲁内尔（Isambard Kingdom Brunel）在工程界享有盛名。他出生于1806年4月9日，是马克·布鲁内尔（Marc Brunel）和索菲亚·金德姆（Sophia Kingdom）的儿子。作为一名工程师，马克在大规模生产流程方面取得了重大进展，他雇用儿子参与建造他最伟大的作品之一——泰晤士河隧道。伊桑巴德·金德姆·布鲁内尔年轻有为，他取得了巨大成功，24岁便成为英国皇家学会的一名科学精英。

布鲁内尔最大的成就在于他修建的铁路和桥梁。布鲁内尔参与了英国1200多条铁路的建设，其中与他关系最密切的是从伦敦到布里斯托尔的大西部铁路（Great Western Railway），帕丁顿车站（Paddington Station）的外形是他设计的，详细的设计和施工是为1851年的万国工业博览会建造水晶宫的公司负责的。布鲁内尔设计的铁路线总是着眼于美感，线路中的桥梁和隧道都由他本人精心设计。他留下的遗产中有两座桥尤为引人注目，一座是位于康沃尔（Cornwall）索尔塔什（Saltash）的皇家艾伯特桥（Royal Albert Bridge），另一座是横跨布里斯托尔埃文河峡（Avon Gorge）的克利夫顿悬索桥（Clifton Suspension Bridge）。克利夫顿悬索桥是从1831年开始建造的，但是工程却停止了，直到布鲁内尔去世后，才重新开始修建，作为对他的纪念（尽管桥的最终设计略有改动）。布鲁内尔发展了数学分析方法，并将其应用于桥梁设计中，与当时其他英国工程师不同，布鲁内尔曾在帮助备考法国巴黎综合理工大学的学校就读，他在学校接受的教育为他打下了工程学的基础。

布鲁内尔并不总是一帆风顺。他设计的蒸汽船“大东方号”（The Great Eastern）比之前所有的轮船都要大，且可以携带所需的燃料，从而让乘客们能享受从布里斯托直达东亚的奢华旅程，但从建造到下水，“大东方号”始终麻烦不断。由于没有需求，这艘客轮没有服役于当时的任何重要时段，最终被用于铺设海底电报线。

“大东方号”是一场金融灾难，那些投资、建造甚至把它拆掉的公司都遭受了经济损失。“大东方号”有什么成功之处吗？虽然它没有达到预期的目的，也没有为改善人类福利做出贡献，但是作为一项工程，它取得了巨大的发展。它的失败主要在于它超越了时代，

当时没有必要建造一艘如此巨大的船。

布鲁内尔经常错误地判断自己的能力，或者错误地认为自己的宏伟计划是明智的。两个例子可以很好地说明这一点。第一个是他在德文郡建造的“大气铁路”（atmospheric railway），在这条铁路上，火车被活塞拉着沿着轨道行驶，活塞深入贯穿整条铁路的空心管中，“吸着”火车前进。遗憾的是，由于空气不断地泄漏到空心管中，这个系统在实践中行不通。第二个例子是布鲁内尔在大西部铁路上运行过自己设计的机车引擎，这些引擎质量都不合乎标准，不得不被换掉。看来，布鲁内尔高估了自己的能力。

人们存在争议的是：布鲁内尔在一些工作领域，并没有获得应有的成功。布鲁内尔的大西部铁路采用的是2140毫米宽的宽轨，而当时英国的大多数铁路使用的是1435毫米的铁轨。布鲁内尔的友好竞争对手——斯蒂芬孙（Stephenson）父子用的就是这样的铁轨，因为这是马车铁路的轨道宽度，也与矿井中现有轨道的宽度相符，然而布鲁内尔却选择了宽轨，因为在宽轨上行驶更平稳。尽管这意味着宽轨与窄轨将面临兼容性问题，但是布鲁内尔坚持认为，他修建的铁路是英国最好的铁路。然而，随着英国铁路系统的发展，必须有一种轨距胜出。虽然实践证明，在宽轨铁路上机车载重更多，速度更快，而且舒适度更高，但在做决定时，英国窄轨铁路的数量是宽轨铁路的6倍。从工程学角度来看，宽轨更好，但考虑到一致性和简单性，窄轨系统最终胜出了。

工程学与工程师

工程协会分化出了更加专业化的组织，这表明，工程学的发展并没有止于自我组织。工程行业就像一种生命形式一样，随着新的生态环境出现，不断进化出不同的物种，技术的发展，甚至社会的变迁，往往会产生独特的工程学新分支。核工程在20世纪中叶发展成为一个行业，那时核物理已经足够成熟，可以控制并利用核反应发电；生物医学工程也随着医学技术的不断应用而得到了发展。这是一个很自然的过程，随着知识的增长和技术的进步，必然需要精通这些技术细节的专家，这些专业的从业人员需要接受教育和培训，因此创建了专业化的组织作为他们的家园，以及可提供培训的资源。

那么，是什么把工程行业联系在一起的呢？怎样成为工程师？他们

必须做些什么、知道些什么，或者学会些什么才算是真正的工程师呢？有很多有趣的说法尝试概括工程学的本质。这里有两则：1828年起草的英国土木工程师协会章程将工程学定义为“为了人类的使用和便利而引导自然中巨大能源的技术”。美国前总统赫伯特·胡佛（Herbert Hoover）对工程师的体验的描述虽然不如上面的简洁，但同样令人印象深刻：

> 这是一个伟大的职业。在科学的帮助下，我们让想象之物跃然纸上，成为一项计划，这令人着迷。接着，该计划借助石头、金属或能源成为现实，并给人们创造了工作机会，帮助人们得以安家，还能提高人们的生活水平，提升生活的舒适度。这是工程师享有的最高荣誉。[2]

从这些描述中我们可以清晰地看到工程学的特征，这些特征值得我在此一一列出，看看它们是如何在工程实践中体现的，在知识和技能方面对工程师提出了什么要求。

令人惊奇的是，工程学常常被明确地描述为为服务于人类而存在的。这是工程机构的核心目标，不是工程师的人对此感到惊讶，但是工程学的本质是创造对人们有用的技术，增进人们的福利，提高人们的生活质量。工程师大概不会被刻板地认为是出于对他人的仁爱而从事的职业，这种雄心壮志或许只限于医疗等行业。然而，除了让人们的生活更轻松之外，工程项目几乎没有其他意义。从移动电话等现代便利设施，到一直以来对人们健康生活至关重要的污水处理系统，工程师们创造了使人类生活变得更便捷、更健康、更高效的系统。当然，这些并非都是利他行为。正是确定了什么能让人们生活得更轻松之后，工程师们才能将自己的工作变成可行的商业项目。

工程学非常关注人类的需求，这意味着工程师们不仅需要了解人类需求和欲望的本质，还要知道如何创建能够满足这些需求且易于使用的工程产品。这是一个相当大的挑战，特别是考虑到很少有工程师研究如心理学和社会学等能更深入了解人类欲望和需求的社会科学。关于工程师们是否需要这方面的教育，我将在以后进行探讨。

人类需求并不仅仅是工程师需要涉猎的领域。一项活动之所以能成为工程，是因为它通过改变人们居住的世界来满足人们的需求。工程学可能涉及从地球上提取天然材料，对其进行加工，使其能够满足人类的需求，例如用石油和天然气制作燃料，用石头、木材和金属建造建筑物，制造工程产品。工程学也可能涉及利用自然规律来制造工程产品和

系统，从而使我们能够创造动力、利用能源，从蒸汽机到飞机皆是如此。工程学还可能涉及利用天然材料和自然规律来制造新材料。

因此，工程学本质上具有创造性——它需要利用自然界的事物来创造新事物，或者使事物以新的方式运转。工程师永远不应该满足于现状，成功的工程师总是想要“干预”，想要改变事物，使它们更好地发挥作用。

当然，工程师的创造力自然会因世界所提供的资源、这些资源的性质以及自然规律的局限性而受到制约。因此，了解材料的性质，了解物理规律，对于理解工程学的复杂性和发展历程至关重要。工程学建立在物理、化学等基础科学上，工程师需要对这些基础科学有一定的了解。正是对科学理论的理解和应用使工程学区别于手工艺行业，或更简单实用的手工职业。数个世纪以来，人类都在利用环境中的资源获取食物、衣服和住所，但正是讲究方法地、自觉地、科学地利用自然材料和规律，才使工程活动区别于从洞穴到家庭手工业中的各种实践活动。

所有这些要素对于工程学都是至关重要的，而且构成了工程学的核心。但是要充分描述工程学的概念，不仅要看它的核心是什么，还要看它的边界上发生了什么，这很有帮助。工程学与技术、科学和数学并驾齐驱，但工程学与它们又有何不同呢？

工程学与科学

工程学与科学显然是紧密相连的，人们经常说工程学依赖于科学，把工程学描述为“应用科学”就暗示了这种依赖性，把工程学归类为应用科学可能意味着，工程学的作用是次要的，是为科学发现寻求用途，而不是自己去发现。这在某种程度上暗示着工程学更平淡无奇，更缺乏创造性，涉及更多的是体力劳动而不是脑力劳动。

把工程学视为应用科学的观点，以及该观点所蕴含的关系，有时会让工程师感到难以接受。科学似乎占据了大众的视野，甚至因开拓性的工作而获得赞誉，但那些实际上是工程学的成果。例如，工程师通常不会说“It's not rocket science”[1]，他们指出那确实不是火箭科学，而是火箭工程：是工程师，而不是科学家，建造了探索太空的航天飞机，设计和制造了环绕地球的人造卫星。当然，火箭工程（这是一个非官方名称，该分支的官方名称为航空航天工程）在很大程度上确实依赖于物理学，但这是否意味着工程师只是在做应用物理学家所做的工作呢？工程

师是否只是简单地运用并遵循科学理论，像按照食谱做菜一样，生成一个可正常运转的产品呢？工程学中的实际设计过程远远不是如此简单，工程师既要理解科学理论及其局限性，还要理解哪些应用是必要的，哪些可能成功。寻找科学理论的可行之处，调整知识架构以得到有益结果，这些活动本身就是极具创造性的。

太空探索需要工程师

知道如何把一个人送入太空和真正地实现这个目标，两者相去甚远。虽然没有物理学基础的指导，人们不可能设计出太空旅行的交通工具，但如果没有工程学，这一成就也是不可能实现的。火箭工程背后的基础科学不是尖端科技，而是牛顿物理学。牛顿物理学始于17世纪，解释了重力对运动物体的影响。

太空旅行的主要挑战之一就是克服地球的引力，这种巨大的力使物体难以离开地球表面。一旦克服了地球引力，宇宙飞船就可以很容易地飞行，最终在轨道上自由地移动。太空飞行器需要巨大的推力才能克服重力作用，这需要通过助推火箭来实现，助推火箭把卫星或者太空飞行器送入轨道或更远处。

太空飞行技术是从第二次世界大战中制造导弹的火箭技术发展而来的。在第二次世界大战中，研发的重点是为导弹提供足够的推进力，使它能飞到足够的高度，使其在制导下降的过程中能够飞很长的距离（当然，在其着陆时，会造成死亡和破坏）。其挑战很大程度上是一个理论上看似简单，实际上却意义重大的艰巨任务，那就是建造一种火箭，这种火箭要靠高挥发性燃料提供动力和所需的推力，并且在飞行过程中不会摧毁火箭和装载物——这一目标经多次尝试都未能实现。

因此，太空探索离不开工程学。毋庸置疑，早期的太空飞行员在未知领域首次进行极其冒险的旅程时，必须具备十足的勇气，但同时，正是一群技艺精湛的工程师的梦想和努力把太空探索的理想变成了现实。这些工程师中最重要的是韦纳·冯·布劳恩（Wernher von Braun，1912—1977），这位火箭工程师在第二次世界大战后把自己的技术和机密信息带到了美国；还有谢尔盖·科罗廖夫（Sergei Korolev，1907—1966），参与了苏联的火箭计划。这个计划最终通过火箭把第一颗卫星送入了轨道，并把第一个人送入了太空。

实际上，工程学与科学迥然不同，它们出于不同的原因，以不同的方式探索世界。科学旨在通过观察世界和发现新现象来构建和检验理论，从而更好地理解自然世界；工程学则是在设计和测试不断循环的基础上创造工程产品，从而让人们更好地适应自然世界，在其中生活。这种差异可以用多种方式来表示。物理学家欧阳莹之这样说："自然科学家们发现未知之事，工程师们创造未有之物。"[3] 还有人这样区别科学与工程学：科学的主题是事物是怎样的，而工程学的重点则是事物可能会怎样。

人们普遍认为，科学的目的是描述世界，那个世界是独立于科学家的描述而存在的。科学揭示大自然的奥秘，只是为了讲述一个好故事，基于讲述者的哲学观点，这个故事可能是真实的，也可能是对观察到的事实的一个不错的解释。但是工程师想要了解这些奥秘，以便利用这些奥秘在与大自然的博弈中发挥作用，并重塑世界。工程师想了解世界，是为了改变世界。如果科学家为了了解世界而改变了世界，那么就可以说他们未能成功地描绘世界的本来面目。

为了更明确地划分科学和工程学之间的界限，我们可以说，区分科学家和工程师的关键活动是工程师从事设计。下面引用美国土木工程专家亨利·波卓斯基（Henry Petroksi）的话说明："设计和开发的理念是工程学和科学最大的区别，科学主要关注的是了解世界的本来面目。"[4] 设计是系统地、有条不紊地设计和创造新事物，正是通过设计活动，工程师与可能的世界，而不是现在的世界打交道。工程师追求的是发展或改进现有的事物，但是他们受到世界可能的样子的制约，也就是说，他们必须在物理和数学定律允许的范围内工作。因此，他们对可能世界的探索不同于艺术家或讲故事的人。而且，不同于讲故事的人，甚至不同于科学家，工程师的工作不仅仅关注世界可能变成什么样子，还要关注如何改善世界。工程师的目标是创造能在人们生活中发挥重要作用的工程产品。

然而，重要的是，不要过分强调科学和工程学之间的区别。两者并不是一枚硬币的两面，而是一条光谱的两端，而且在很大程度上并不处于两个极端。工程科学领域的核心与其说是设计，不如说是物理学。工程科学致力于对人造世界，或至少人造世界的某些方面进行分析描述，它研究从桥梁到飞机等工程产品的行为，以及它们与自然环境联系和受自然规律影响的方式。工程科学旨在了解世界上那些直接受到人类影响的地方，其目的是了解世界，以便最终能够更好地设计和维护工程产

品。许多研究领域都处于自然科学、工程科学和实用工程学的边界上，其中一个领域就是电子学。在电子学领域中，对物理现象的认识、电子系统的建立以及它们在实验中的应用是紧密联系在一起的。电子学领域的研究人员很难把自己定位为工程师或物理学家，因为在这些领域，本来就不清晰的边界变得非常模糊，几乎不存在了。

工程学与其他技术

应该如何区分工程与技术呢？这两者经常被同时提及，在讨论技术时，其内容中经常隐含着工程。技术是一个宽泛且具有包容性的概念。它可以指一组由人类设计制造的物品，也可以指物品产生的过程以及参与该过程所需的知识。一些作家以技术和技术的历史以及技术在人们生活中的地位为题材，他们常常把技术理解为所有由人类制造和设计的物品的总和，可以从家庭手工业追溯到洞穴中的粗糙发明。技术的历史通常始于人类早期的工具生产，这是最早的技术实例。因此，在本书开头就被排除在原始工程学之外的那些活动都可以被归类为技术。

根据这种定义，工程是技术的一个子类别，但是等级和烘焙、裁剪以及陶艺一样，是技术的一种形式。然而，工程之所以脱颖而出，是因为它具有一种特别复杂的知识体系，能够生产极其有用、精巧和适应性强的工程产品。本书感兴趣的是人类设计中较为复杂的一部分，以及这些设计是如何改变人类生活的。人们普遍认为，技术是人类生存的基础，工程学虽是相对较新的学科，但它明显改变了人类的体验。

在日常语境中，“技术”一词用来指高科技、电子技术领域取得的最新进展。如果你去浏览报纸或网站的科技版块，你会发现，最重要的主题都是电子产品的最新进展。这些产品虽尚未成为主流，但一小群爱好者正欲购置它们，并检验其神奇力量。从这个意义上来说，技术与工程有着非常密切的联系，但这两个概念仍截然不同。虽然高科技和任何领域的最新进展都与工程联系紧密，但往往只是部分重叠。在开发高端电子产品方面，工程发挥了一定的作用，但是，从这个意义上讲，技术同样体现在设计、营销、商业和每个专业领域开发新技术的专业知识中。工程给这些领域带来的是，应用最新的科学进展，为每个领域带来突破。正是因工程学特别关注利用科学知识来创造突破，才使工程学有别于其他发明和制造领域。

乔纳森·伊夫和苹果公司

有些设计领域注重形式，例如服装设计和家具设计。相比之下，工程设计则主要关注功能。注重形式和注重功能的设计之间存在着一系列的设计活动。工业设计就处于这两种设计的模糊边界上，从事工业设计使乔纳森·伊夫（Jonathan Ive）能够同时兼顾20世纪90年代和21世纪头10年最流行的一些电子产品的形式和功能。在苹果公司工业设计部门任职期间，伊夫彻底改变了个人电脑、音乐播放器和手机等电子设备的外观。

作为一名产品设计师，伊夫学习了工业设计之后，曾任职于多家设计公司，最终他苹果公司签订了合同。伊夫所做的工作与工程学有关系吗？这当然触及了工程学的界限。工业设计师的一项重要工作就是考虑如何生产产品，正是这种对生产过程的关注，把工程学引入了设计师的世界，使他们在设计过程中考虑生产过程的成本、效率和组织因素。

伊夫和苹果公司其他员工工作的核心就是关注生产过程，他们运用标准材料，以创新的方式产生新奇的效果。《商业周刊》（*Business Week*）上一篇关于伊夫的文章这样评论伊夫和苹果公司在注塑成型方面的工作："以苹果公司在注塑成型方面的开创性工作为例，其中部分是科学，部分是艺术，还有大量的试错。"[5] 这几乎就是工程学的定义。

试图论证伊夫是不是一名工程师没有真正的价值，而且毫无疑问，他的角色与电子工程师的角色截然不同，后者主要负责设计和开发iPod音乐播放器中用于存储文件的硬盘，但伊夫的工作表明，工程学领域和美学领域确实有重叠，工程学不仅与科学家相关，而且与艺术家也息息相关。

工程学和设计同样是紧密相关的两个概念，但设计包含一系列的活动，其中工程位于这些活动的谱系的一端。工程师想出一些方法创造世上原本没有的事物来满足人们的某些需求，设计师同样如此。这种活动把工程师与科学家、特定行业的手艺人区分开来，科学家坚持于现存事物，手艺人则按照计划或指示，制造被要求制造的物品。但是在大众看来，设计并不等同于工程，设计常常与美学联系在一起，在大多数人的观念中，典型的设计师就是设计服装、家具或书籍封面的人。

在工程设计中，功能肯定比形式或外观重要得多。工程设计既需要创造性技能，也需要科学分析，因为设计过程就是通过探索物理上可能

的方法，创造工程产品来满足某些需要。目前，越来越多的人借助计算机模拟来探索和改进不同的设计方案，这与服装设计师自由创作的草图相去甚远。但是，设计在工程学中处于中心地位，意味着工程学本质上是一门创造性的学科，包括构思解决方案和试错测试，工程学的这一方面往往被淡化，人们更倾向于强调科学理论与数学的严谨性在工程学中的应用。

工程学是一门复杂的学科。它经历了几个世纪才兴起，而且与许多其他学科相关联。因此，说工程学本质上与人们的生活息息相关并不奇怪。工程学触及人们生活的方方面面，随着生活质量的飞跃而不断发展，也常常促进生活质量的飞跃。工程学的历史在人类历史中扮演了重要的角色。下一章将概述各个工程学科是怎样在人类历史上开创新阶段的。

章后总结

- 工程学并不是在历史的某个特定时间点上体系完善地出现的，而是在很长的一个时期里发展起来的。
- 从词源上追溯，中世纪的“工程师”及法语中早期的“工程师”主要参与战争和军事工程。
- 17世纪后期，法国军队成立“精灵军团”，其中的士兵接受专门的军事技术培训，工程学由此成为一门专业。18至19世纪，随着工程教育先后在法国、美国、英国得以发展，土木工程从最初的军队工作中分离出来，现代工程学由此产生。
- 除工程教育的兴起外，专业工程团体的成立对于工程行业的形成也至关重要。1846年，英国机械工程师协会成立，首次与土木工程分离开来。之后，工程协会不断分化出更加专业化的组织，产生新的分支工程学科。
- 工程学为服务于人类而存在，关注人类的需求；工程学本质上具有创造性；工程师的创造受到自然规律的制约，因此需要了解自然规律和材料。
- 工程学与科学的区别在于，科学理解、描述世界，工程学改造世界；区分科学家和工程师的关键活动是工程师从事设计。然而，工程学和科学没有绝对明确的界限。

- 工程学区别于其他发明制造技术的原因在于，工程学具有一种特别复杂的知识体系，利用科学知识来创造性突破，以及设计在工程学中处于中心地位。

A ENGINEERING

BEGINNER'S GUIDE



工程的世界与世界的工程

工程学有哪些分支学科？

这些分支学科都是做什么的？

工程学是怎样改变世界的？

工程学的历史是一个学科不断多样化和专业化的发展历史。由于新技术的研发和新技能、新方法的出现，工程学的分支学科应运而生，每个分支学科有其专门知识。工程学分支的发展始于土木工程从军事工程中分离，随后，机械、电气和其他工程团体也从原土木工程师从事的各种工程项目中脱离。此外，通过引入工程学方法，已有的手工艺行业发展成为工程学科，从而形成了工程专业。

本章将阐述工程学改变物质世界的方式。通过考察每个工程学分支学科对周遭世界以及人们生活方式的影响，本章将展示每个工程学科所涉及的内容。但我们应该认识到，每个单独的工程学科本身只能产生有限的影响，各种专业之间的界限很模糊，很多工程师处于各种专业的边界，而且最重要的工程项目通常需要多个学科之间的合作。无论是哪种类型的工程师，他们的基本技能之一就是掌握多学科知识，能够和其他领域的专家合作，并从更宏观的视角了解自己的工作与整个计划的契合之处。

工程师作为一个集体已经改变了世界，没有任何一门单一的工程分支学科可以自称是最有影响力的。

土木工程：创建城市，改变乡村

如前文所述，土木工程是现代工程学科中最古老的分支。土木工程的英文为“civil engineering”，其中的“civil”（平民的）一词最初可能是为了把从事非军事项目的工程师与支持士兵作战的工程师区分开来，但它也与文明的概念密切相关。

因为土木工程掌管着水这一支撑人类生活的关键因素，所以人们才能在大型村落和城市中过着健康安全的生活。因此，土木工程师负责规划、设计、建造隐蔽的迷宫状管道系统，把水输送到家庭，用于饮用和洗涤，但还有一点也许更重要——他们建造了排污的地下管道。有了对清水和污水的管理，人们才能够在大城镇和城市中生活，如果没有对清水和污水进行管理，人们就会面临着因自己产生的废弃物而中毒的风险，事实上历史上的人们也确实经历过此风险。土木工程师还通过建造防洪工事和堤坝，保护人们免受水带来的威胁，驯服了曾控制人们生活中水域位置的自然力量。

现代文明还有一个关键要素是交通系统。有了交通系统，人们就能

够前往离住所较远的地方，到集中的办公室和工厂工作，也可以通过廉价、快速的旅行与远离住所的他人保持联系。土木工程师建造和维护交通基础设施，有了公路、铁路、桥梁和隧道，交通系统就能够克服自然障碍。交通系统不仅对个人出行很重要，对工业也至关重要，有了它之后，在国内某个地区生产的货物就能够运输到另一地区，也可以运输到海岸出口。在工业革命和铁路迅速扩建之前，土木工程师们对乡村的水道进行了改造，使之能够满足采矿业和其他工业的运输要求。交通基础设施也曾一度是通信基础设施，因为有了公路和铁路，邮政服务才得以存在，而邮政服务反过来又支持了现代工业和个人通信的发展。

然而，土木工程师并不亲手挖掘隧道或铺设柏油马路，他们作为项目经理，负责管理庞大的工作队伍。这些工作队伍对于实施大规模项目至关重要，如建设高速公路或下水道网络。土木工程的这个特性把现代工程师与罗马和埃及时代的早期工程工作联系了起来，金字塔的建造无疑涉及土木工程的一些关键技能，比如管理庞大的劳动力队伍以及运输建筑材料。随着土木工程师利用现代方法和计算机软件来管理建筑项目，这些技能现在变得更加复杂。土木工程师也运用数学方法，以确保他们设计的隧道和桥梁不会开裂或移位，并且分析建筑物所在地的土地性质，为项目设计提供依据。土木工程师必须开发新技术以确保建筑工作的可持续性，而且不会对环境产生不利的影响。

一些土木工程项目似乎都已经完成了，人们已拥有所需的基础设施，只需要进行维护。但是，世界上仍有一些地方没有净水，没有污水处理系统。在有这些系统的地方，土木工程师常常会面临挑战——维护基础设施也是一项艰巨的任务。全球人口的普遍增长和大城市的不断膨胀，意味着交通和供水基础设施不断受到日益增长的需求带来的压力。许多城市仍使用几代人之前建造的供水系统和污水处理系统，这些系统正面临着腐朽的威胁，却因为建造在城镇地底深处，所以翻修会是破坏性的、耗资巨大的工程。只要有人在，土木工程就会面临挑战。

可以说，土木工程师对这个世界的地貌产生了最深远的影响，其中一些最根本的变化是由于土木工程师改变了人们生活中天然水的位置而造成的。以胡佛水坝为例。建造胡佛水坝是为了阻断科罗拉多河，灌溉周围的沙漠土地，并利用水力发电，这是改变地貌的最大胆的尝试之一。这座水坝于1936年完工，形成了一个长240千米的人工湖，水坝是一座陡峭的人造混凝土悬崖，高221.6米，位于距离拉斯韦加斯48千米的布莱克峡谷岩壁之间的河床上。水坝改变了当地的地貌，使其由沙漠

变成了被科罗拉多河滋养的可居住地，水坝本身也为美国增添了一道壮丽的风景。不过，土木工程师要对一些相当微妙的干预负责。喀里多尼亚运河利用了横贯苏格兰的天然湖泊，并将它们延伸，形成一条连续的水道。巴拿马运河的建成与之相似，但是规模更大，巴拿马运河横贯整块大陆，开辟了一条穿越美洲的通航航道。

这样的事物是否会被视为地貌中的强加之物呢？无论人们多么依赖它们，我们是否会认为土木工程使环境恶化了呢？许多运河和水库几乎成了自然景观的一部分，人们享受着这些自然景观。在欧洲，人们在运河沿岸骑行，如果考虑他们的最初目的的话，这就像是在高速公路旁野餐一样。因为已经建造了这些运河和水库，它们也已经成了人类遗产的一部分，所以我们就应当接受它们吗？又或者，我们接受它们，是因为它们虽然改变了乡村地貌，但并没有造成破坏吗？这些变化在很多方面都是农业对地貌景观所做改变的延续。土木工程师并不是第一批通过改变人们生活方式来改变自然景观的人，现在农村的很大一部分与自然所创造的原本面貌截然不同了，人们以适合农业耕作的方式改造了自然。土木工程师对自然景观的影响是否与农业发展所带来的变化相似呢？随着土木工程师越来越关心他们的工作对环境造成的影响，这些无疑都是他们要扪心自问的问题。

结构工程：更高、更轻、更强

土木工程和结构工程是紧密相连的专业，两者都将原本简单的建筑工程提升为规模宏大、雄心勃勃、组织严密的建设项目。结构工程的主题鲜明，那就是结构的设计和施工，但其方法是定义结构工程的唯一因素。结构工程是将分析方法应用于结构设计过程，以便能够建造更大、更轻、更安全、更有弹性的结构。结构工程也涉及开发具有适当性能的建筑材料，即强度大、轻巧、灵活且成本合理的材料，以实现建筑师的远大抱负。

并不是每座建筑的背后都有一个结构工程师——建筑师和建筑工人通常可以在没有结构工程师直接参与的情况下完成工作。这在一定程度上是因为结构工程师的知识是从教科书里以及建筑设计及施工中使用和遵循的建筑规范里提炼出来的。不过，现代的摩天大楼、体育馆、火车站、机场、医院和其他大型复杂建筑的建造都依赖于结构工程师的积极参与。现在的桥梁跨度更长且外观精美，这就需要通过结构分析来进行

设计；船舶、火车和飞机等复杂的交通工具也需要结构工程师的参与。结构工程师负责设计大型车辆和船只的结构，在元件的破坏性影响下，这些结构会受到车辆和船只高速行驶产生的应力的影响。因此，结构工程师还要学会运用其他学科的知识，既有建筑学和土木工程，还有机械和电气工程。

结构工程师需要懂得如何开发结构，这样它们才能经受住正常和极端条件的考验，其关键在于明白结构倒塌的原因。一次结构工程上的失败会导致成百上千人丧生，因此了解结构失败的原因是一项非常重要的任务。结构工程师对建筑物和桥梁的倒塌进行了深入的研究和分析，以设计出不容易倒塌的结构。例如，人们研究"9·11"事件中纽约世界贸易中心的倒塌方式，以便设计出能够更好地抵御火灾影响的高层建筑。[1] 结构工程师肩负着重任，他们要确保自己设计的建筑物足够坚固，能承受比预期更大的负荷和作用力，因而他们必须使用恰当的材料，并且按照规范施工。

结构工程创建了世界上一些最引人注目的地标，还改变了现代城市的面貌。上海东方明珠塔、伦敦眼、帝国大厦等摩天大楼的建成都归功于工程师对结构认识的不断加深。古斯塔夫·埃菲尔（Gustave Eiffel）因两项著名的结构工程壮举而声名显赫，一是建造埃菲尔铁塔，二是参与合作设计自由女神像的坚固支架。在大城市的诸多建筑背后，有一群不为人知的工程师，是他们改变了人们对建造高层建筑的认识，摩天大楼才得以出现。

水晶宫是为1851年的万国工业博览会而在英国建造的，虽然当时看起来不太可能，但其"幕墙式"的建筑方式也许给现代建筑带来了灵感。钢铁和玻璃组成的结构由金属框架支撑，玻璃面墙"挂"在金属支架上。这是对当时建筑方式的一种变革，因为当时建筑的高楼都是由下方的墙来支撑的。[2] 这种新的建筑方式使建成高层建筑成为可能，正如当今的建筑可以建得很高，还不用修很厚的砖墙来支撑高楼层。纽约和东京等城市在许多方面展示了结构工程在塑造现代城市面貌方面所做的贡献。

许多著名的结构工程项目是通过建筑师、工程师、建筑公司合作完成的，公共建筑还涉及政界人士，这种合作有时困难重重。奥雅纳公司修建悉尼歌剧院的情况就证明了工程师面临的困难。然而，一些开发出来的工具使建造复杂建筑的过程变得更容易了些——基于计算机的设计工具能使身处世界不同地区、说着不同语言的大型团队之间快速制订并共享计划。成套的设计文件中渗透着几代结构工程师的知识精粹，这样

工程师在创造宏大设计的同时还能很好地控制其中的风险。

奥雅纳公司和悉尼歌剧院

很少有结构工程师会像建筑师一样引人注目，但奥韦·阿鲁普（Ove Arup，1895—1988）可以说是最著名的结构工程师之一，这主要得益于以他的名字命名的公司的作品。悉尼歌剧院是奥雅纳公司最引人注目的项目之一。

悉尼歌剧院最初的建筑师是约恩·乌松（Jørn Utzon），他绘制的一幅建筑草图在一场公开的设计比赛中激发了评委小组的想象力。奥雅纳公司被指定负责该项目的结构工程。悉尼歌剧院的主要特色是它的屋顶，屋顶由一系列贝壳状的混凝土拱顶组成。拱顶的不规则形状是一个极大的工程挑战，奥雅纳公司的任务是建造一个屋顶模型，并对其进行抗压测试，以评估其抗风能力。由于设计非常复杂，在整个设计和建造的过程中需要进行一系列的变更，而完成该项目的压力意味着歌剧院的某些部分要在其他部分的计划最终敲定之前就要建成，这使奥雅纳公司的工程师们在完成大量工作之后，还要进行调整，以适应设计的变更。

建筑师、建筑承包商和政界人士之间的紧张关系使建造歌剧院成了工程师的一项艰巨任务。阿鲁普在谈到这个项目时说：“我得说，我们接受这份工作简直太疯狂了，我不是在抱怨，我只是在说这有多难。我从没想到会这么难……这会让我少活两三年。”[3] 他不是歌剧院建造过程中唯一受苦的人物。乌松由于与政府意见不合，辞去了建筑师的职务。

悉尼歌剧院在没有明确的施工过程、时间计划和财政预算的情况下就开始了建造工作。1957年1月，这一工程的首次预估成本为700万美元，而最后的数字与此差距甚大，达到9950万美元，完工日期延迟了近10年，1973年才由英国女王正式主持了落成典礼。尽管奥雅纳公司在建造悉尼歌剧院期间遭受了许多磨难，但他们突破了工程学的界限，建成了世界上最令人惊叹、最著名的地标之一，这对他们来说无疑是一次成功。

机械工程：从火车到1000制动马力

虽然工程学的核心是结构和基础建设，但其灵魂无疑是机器。在普通人的想象中，工程师就是一个构想、建造、摆弄和修理发动机的人。从设计到调试赛车的发动机，机械工程中的“engineer”（工程师）与“mechanic”（机械师）有着密切的联系。机械工程形成了一系列活动，一方面与手工艺相结合，另一方面与物理学相结合。

机械工程的核心追求是利用自然力量，把天然燃料转化为有用功，因此，机械工程有着悠久的历史，可以追溯到人类发明机器来扩展自身力量和工作能力的时期。人类最早利用的是水力、风力和畜力，接下来是工业革命时期的蒸汽动力，再到20世纪核链式反应产生的能量。如今风能和波能再次重要起来，但现在它们是用来发电的。

机械工程史上的一个关键点是蒸汽机的发明，蒸汽机是基于从深矿中抽水的蒸汽泵而发明的。在工业革命时期，随着对煤的需求的增长，蒸汽机得到了迅速的发展，人们也做了大量努力对其进行改进，这个过程持续了几十年。此外，在蒸汽机设计和制造方面取得的重大进展也是第一次运输革命的核心，因为它促进了蒸汽机车和明轮船，甚至蒸汽动力汽车的发明。内燃机是在19世纪末研制出来的，虽然它在工业上也有一定的应用，但这项技术的真正影响在于其在汽车上的应用，并由此引发了汽车革命。机械工程师也是电气革命的核心，因为机械工程师是设计燃煤、核能、水力发电和所有其他发电站的关键。

机械工程对动力的需求与对精度的需求相辅相成，如果没有制造发动机精密部件的技术，蒸汽机和内燃机都不可能存在。作为机械工程的一个重要组成部分，机械加工用统一、精确的方式制造机器的金属部件，随着机器的日益复杂，愈发需要更精密的部件，机械工程也随之不断发展。

为了更好地了解发动机及其所驱动的车辆的运行规律，机械工程产品在发展中创造了自己的科学。在人们试图了解热力和动力在如蒸汽机等系统中的运动时，热力学产生了。英国的托马斯·纽科门（Thomas Newcomen）和瓦特等工程师改进了蒸汽机的性能。法国科学家萨迪·卡诺（Sadi Carnot）分析了蒸汽机的工作原理，他的分析奠定了热力学第二定律的基础。流体动力学和空气动力学描述物体（如船舶和飞机）在空气和液体中的运动，或流体在机器（如蒸汽涡轮机）中的运动，它们是机械工程师的重要工具，机械工程师还可以用它们来设计更高效的发动机和车辆，例如蒸汽涡轮机和飞机。机械工程师必不可少的其他工具包括材料力学和应力分析，利用这些工具，他们能设计出足够坚固、刚

硬、耐用的，能达到预期目标的机器和结构。机械工程师需深入了解这些应用科学，以及其在从改进汽车发动机到建造整艘战舰等一系列设计问题中的应用。

机械工程对现代世界的面貌和运行方式的影响是不可估量的。蒸汽火车的发展引发了“铁路热”，英国各地疯狂投资建设铁路，同时世界各地也出现了相似的热潮。铁路缩短了乡村间的距离，使长途旅行和长途运输成为可能。铁路对美国的影响尤为显著，横贯大陆的庞大铁路工程把不同的海岸连接起来，并开辟了一条穿过未知的蛮荒地域的道路。印度庞大的铁路系统也产生了类似的影响，目前它仍是交通基础设施的重要组成部分。

汽车也改变了世界上许多人的生活。这些汽车包括从福特大规模生产的T型车到2008年塔塔集团专为印度市场研发的“Nano”汽车，该车上市时售价略高于2000美元。当然，航空旅行使我们的世界变得越来越小，人们不仅能够在一天之内周游世界，而且海外旅行成为越来越多的人的选择。我们生活的方方面面，无一不受到运输机械工程师工作的影响。许多国家依靠交通运输将食物和燃料从原产地运送到消费者手中，运输系统遭受事故或极端天气的影响时，很快就会造成混乱。

机械工程师不仅参与设计精密且强大的机械，还参与一些巨大的工程挑战，如开发功能性假肢，研发可持续能源解决方案等。大多数发电方式需要机械工程师的技术，如利用可再生能源和低碳能源，尤其是利用风能和波能发电。机械工程师还需要确保飞机、跑车、空调系统的技术等最耗能的技术，能更加节能高效，从而减少对环境的破坏。

詹姆斯·韦伯太空望远镜

卫星工程是一个涉及多学科的领域，涵盖机械工程和电气工程，并且严重依赖于软件开发。卫星工程拓展了已知世界的边界。通过卫星观测太空，对于增长人们对宇宙的认识至关重要，因为卫星使人们能够更深入地观测太空，从而更深入地追溯宇宙的历史。

詹姆斯·韦伯太空望远镜（见图2-1）是一个由工程师和太空科学家组成的国际团队发明的，目的是取代美国国家航空航天局（NASA）的哈勃望远镜。哈勃望远镜和天文台的观测结果显示，通过观测电磁波谱的红外波段我们可以获得很多信息，正是在光谱的这一部分，我们可以观测到更远的天体，追溯更早的宇宙的历

史。詹姆斯·韦伯太空望远镜将安装中红外仪器（Mid-Infrared Instrument，简称MIRI），寻找大爆炸后形成的第一批恒星发出的光。詹姆斯·韦伯太空望远镜还将通过观测环绕新生恒星的尘埃来观察新恒星和星系的形成。这些尘埃在红外线辐射下是透明的，但在可见光下是不透明的，因为要寻找红外线，所以中红外仪器必须保持极低的温度，这样望远镜本身就不会散发热量，造成干扰。望远镜的某些部件需要在绝对零度以上，6.7摄氏度以下才能正常工作。

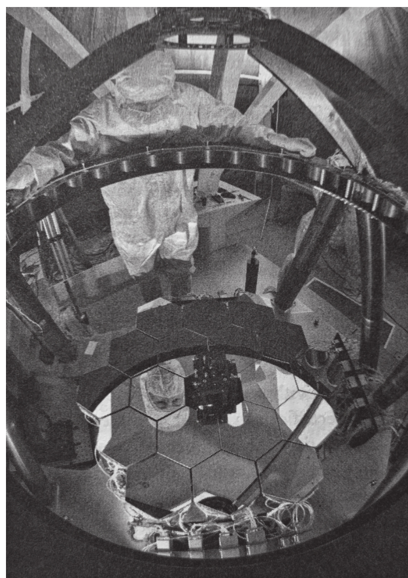


图**2-1**　詹姆斯·韦伯太空望远镜

光学实验台上的詹姆斯·韦伯太空望远镜模型，该模型功能齐全，大小为原型的1/6。

资料来源：美国国家航空航天局

这样的项目存在着巨大的工程挑战。仅仅是测试卫星的冷却系统就需要建造测试设备，以模拟卫星和照相机工作的寒冷环境。这样的项目是高度复杂的工程，其复杂性不仅体现在技术方面，还体现在工程师和科学家团队的协调方面。这些工程师和科学家来自12个国家，各自负责整个项目中一个复杂的部分。这启发我们：对世界起源的认识不再是古代哲学家独自思考的问题，而是技术团队的共同努力。

除了探测太空深处，卫星工程还有一个广泛的应用领域是观测地球。第一批从太空拍摄的地球照片塑造了后世对世界的认知。如

今，卫星经常从太空中拍摄图像，用于各种日常用途，比如通过全球定位系统（GPS）追踪交通状况，以及监测农作物的生长状况。

电气工程与电子学：电力的普及化

电气工程师负责设计和制造由电力驱动的设备，以及能够传输和分配这些设备的电力系统。电气工程的发展在很大程度上依赖于物理学领域中的发现，物理学的一些关键人物，如法拉第和麦克斯韦研究了电磁现象。最初只有科学家对这个现象感兴趣，但后来工程师看到了其在发电和配电方面的潜能，因而加以利用。

推动电力分配发展的因素之一是广泛安装电灯的运动，这一发展过程的核心人物是爱迪生。在任何关于工程学发展的故事中，他都是一个必须提及的人物。电灯带来的变革并不像人们想象的那样迅速而突然，当时的人们并不都热衷于用电灯代替煤气灯，他们认为，电有潜在的危险和不可靠因素。但是，最初的那些阻力很快就被克服了。现在对于数十亿人来说，如果没有24小时的电力和照明，生活将难以想象。然而，电气化的进程尚未完成，值得思考的是，目前世界上约有20亿人仍未得到电力供应。

电灯的发展并没有止于爱迪生不断完善灯泡的尝试。相反，随着现代建筑中精密照明系统的发展，以及工程师们创造新的照明方式取代高耗能的灯丝灯泡，电灯不断发展。人们从使用荧光照明到使用如LED灯等固态照明，有望带来更廉价、更持久、更节能的光源。

电力把其他学科的工程师吸引到了电气工程领域，因为电力提供了一种清洁且可能低污染的能源形式（当然，这取决于发电的方式）。就像蒸汽火车被柴油火车取代一样，电力火车现在占据了主导地位，从事铁路开发的工程师既可能是机械工程师，也可能是电气工程师。同样，随着对减少污染的需求的不断增长，对电动汽车的需求也在增长，开发面向市场的混合动力汽车和电动汽车已经成为电气工程师的一个重要工作领域。

不难想象，电气工程对人们的生活体验有多么重要，它与土木工程、结构工程和机械工程一起，创造了现代城市的精髓。历史学家托马斯·休斯（Thomas Hughes）说：“电力让现代纽约得以存在。”照明、电力、电梯、电动火车、工业用电动机，这些都是城市生活中不可缺少的部分。如果没有电力来使电梯运行，像埃菲尔铁塔或帝国大厦这样的结

构工程杰作就成了华而不实的摆设，只有一些运动员才能到上面看风景。电气工程对于结构工程师的工作是不可或缺的，电气工程贡献出跳动的心脏，给予他们热量、光明和动力。

电气工程师在发电、输电和电机方面打下了坚实的基础，电气工程的科学基础在于了解电磁学和物理定律，比如高斯定律把电荷与电场联系起来，弗莱明左右手定则描述了电动机和发电机中运动方向、电场方向和电流方向之间的关系。利用描述电路中电荷和能量守恒的基尔霍夫定律，电气工程师成了电路设计和分析的专家。

与机械工程一样，电气工程也在迅速向前发展。随着电气工程产生的技术越来越专业化，它也创建了新的分支学科。与电气工程密切相关的一个领域是电子学，这是一门了解电子运行，利用电子的特性来开发电子设备的学科。电子学是工程学和物理学相结合的一门学科，很难区分工程学系的电子学和物理实验室里的电子学，而且电子学领域的许多工程师否认他们所做的工作与物理学家所做的工作之间有明显的区别。例如，半导体的发展与物理学和工程学都息息相关。半导体是介于电绝缘体和导体（电流可以在导体中传导）之间的材料，它主要用于晶体管。晶体管是一种微小的器件，几乎应用于从收音机到计算机等所有的电子设备中。

电气工程师应该深刻理解麦克斯韦电磁定律，这对研究无线电波在电信领域的传播状况至关重要，而且半导体物理学对于集成电路（又称微芯片）领域也至关重要。与许多其他工程领域一样，电子学利用软件工具设计电路和电子设备，工程学专业的学生和专业工程师也使用一些专有的软件产品。随着电子学和电气工程的发展，它们能够为自己提供越来越复杂的工具，测量电压和电流的模拟装置或者研究信号频率成分的频谱分析仪，已被数字产品所取代。数字产品把数据显示在数字显示器上，而不是显示在需要工程师解读的模拟刻度盘上。

随着塑料电子学的发展，电子学目前正在经历一场新的革命，物理学和工程学正在塑料电子学这个发展的领域中共同创造着改变生活的技术。虽然电路以前只能在硅等刚性表面上构建，但塑料电子学可以把电路印制到柔性结构上。这意味着电子设备可以更轻、更柔韧，可以为移动电话和电子阅读设备制作灵活的可滚动显示屏，甚至有望创造嵌有电子设备的医用敷料，创造出“智能绷带”，可以在伤口不受干扰地愈合的同时，监测并治疗伤口。

塑料电子学甚至可能是开发更廉价的太阳能光伏的关键，光伏发电

是利用自然光来发电，爱因斯坦在使他获诺贝尔奖的理论中首次描述了这一过程。尽管太阳能电池板已经用于小规模发电，但它仍然不能以一种廉价且高效的方式来发电，利用塑料电子学可以更容易地制造更廉价的太阳能电池。电气工程面临的首要挑战之一就是把电力转化为光能，但还有更艰难的挑战，那就是把光能转化为电能。

工程学巨擘托马斯·爱迪生

爱迪生是一位具有非凡毅力的创新者和发明家。他所取得的突破不是“轻按开关”就能获得的洞见，而是需要时间和团队努力才能取得的来之不易的成果。爱迪生在新泽西州建立了著名的门洛公园实验室（Menlo Park laboratory）。在那里，他的团队设定了一个苛刻的目标：每10天交付一项小发明，每6个月交付一项大发明。通过这样的工作方式，爱迪生发明了留声机，这种装置通过在蜡纸上留下印记来记录人类的声音。留声机是唱机的前身，它震惊了世界，并为爱迪生赢得了“门洛公园的奇才”的称号。

爱迪生的名字将永远与灯泡联系在一起。他并不是灯丝灯泡的发明者，但却是这项技术的重要改进者，他花了大量时间寻找制造发光灯丝的最佳材料。爱迪生的目标是设计一套完整的照明系统，包括发电、向家庭和企业供电以及提供照明设备，开发这样一种系统非常具有开拓性，但也有风险。爱迪生谈到这一系统时说：“如果把一股大电流变成纽约街道地下的导体，会发生什么，没人能说清楚。”

爱迪生的发明创造诞生于他伟大的商业头脑，这意味着他的创新聚焦在大众市场和商业潜力上。他一心追求商业上的成功，这也让他卷入了各种各样的法庭案件，以及一些有失尊严的争斗中。他的照明系统以直流电为基础，这主要是因为，虽然交流电具有可以长途配送的优势，但因为缺乏有效的交流电动机，这一优势在一开始就被抵消了。但是美籍塞尔维亚裔发明家尼古拉·特斯拉设计出了一种交流电动机，从而鼓励美国西屋电气公司投资交流电。这个新系统使爱迪生的配电系统受到了巨大威胁，他尽其所能地证明了交流电的不足甚至致命之处，尽管如此，交流电还是作为更好的系统胜出了。

后人不禁要问，爱迪生固执地支持他的系统是出于错误的骄傲吗？是对个人成功的渴望超越了对技术进步的兴趣吗？又或者仅仅

是决心克服障碍和锻造新技术的人必有的一种心态呢？答案已无法确定。

信息与通信技术：策划一场新的革命

信息与通信技术有充分的理由来讨论变革，因为毫无疑问，个人电脑网络化的世界与之前的世界截然不同。工业机械从根本上改变了人们的生活方式，家庭手工业变成了工厂作业，在家里工作变成了到工业中心工作。同样，计算机也改变了许多人的工作生活，创造了新的就业机会，也淘汰了一些旧的工作岗位。通过互联网和电子邮件，人们能在远离工业中心的家中工作，并与世界各地的同事进行经济而迅速的交流。如果没有具有独创性的工程学专注于制造体积更小、价格更低、功能更强大的计算机，这一切都不可能实现。

机械工程和土木工程通过在相隔遥远的地方间建立物理联系而使世界变小，但是信息与通信技术几乎把世界缩小到一种新的程度，人们几乎在瞬间就能与他人交流、发送文件以及从事金融交易，但反过来，信息与通信技术通过创造一个完整的“真实”世界的虚拟附属物，极大地扩展了世界。在很多国家，各个年龄段的人每天花几小时使用电脑在网上商店购买商品和服务，比如衣服和假日休闲活动；通过电子邮件、即时消息和社交网站与朋友和家人交流；随时看新闻、电影和电视。在虚拟世界中，人们可以通过制造和销售可用于多人在线游戏的物品来谋生，一些用户则通过为那些空闲时间少的游戏迷“屠龙”来赚钱。

与许多由工程技术引领的变革一样，计算机革命也经历了一段漫长的酝酿期，颠覆性技术在真正影响大众生活之前就已经出现了。1976年3月26日，伊丽莎白女王就发送了她的第一封电子邮件，当时英国正式成立了皇家信号与雷达研究所，邮件利用了美国国防部高级研究计划局为欧洲防务共同体提供的连接。造成这种滞后的一个主要原因是许多企业和个人在等着电脑价格降到足够低，以便购买。

只有当用户数量达到临界规模时，电子邮件和互联网等技术才会成为每个人的必需品。其中的一个重要因素就是晶体管的开发，这些晶体管体积小、价格低、易于生产，从而产生了体积更小、价格更便宜的计算机。软件的开发对计算机的普及也至关重要，专有的文字处理软件包使计算机变成了比电动打字机更有价值的办公设备，万维网和网页浏览器的开发使非技术性计算机用户能通过网页浏览器来访问互联网。

计算机普及的结果就是全面快速的通信及计算技术革命，我们现在仍身处其中。既然信息通信技术开始迅猛发展，网络世界中的新创意就会以闪电般的速度涌现。例如，网络游戏《第二人生》（*Second Life*）自2003年上线以来发展迅速，其虚拟货币林登币（Linden dollars）来计算国内生产总值，已超过世界上的大多数国家。

虽然信息与通信技术渗透到生活的各个方面，让人们看起来像是成了计算机的“奴隶”，但信息与通信技术仍在不断发展，人们可以在享受身体自由不受束缚的同时享受与外界的联系。移动计算技术在不断发展，使人们可以在移动中访问互联网，而且功能越来越强大的手持设备可以传输以前只能在办公桌上获取的信息。移发动计算技术的最终目标是获取所有的信息，从整个互联网到你的个人文档，无论你身在何处，无论你何时想要都可以获取。

信息与通信技术在一些发展中国家也起到了巨大的推动作用，在一些偏远地区铺设固定电话线路是不可行的，但移动电话使这些地区也能够进行通信。工程师努力开发更便宜、功能更强大的笔记本电脑，这对于教育经费有限、教学场所缺乏的地区的孩子们非常有益。同时，信息与通信技术的发展也带来了一些严重的负面影响：计算消耗的能量急剧上升，人们沉迷网络所产生的碳排放量超过了航空业的碳排放量。开发低耗能计算技术是信息与通信技术面临的下一个挑战。

那么工程师在这一切中扮演了什么角色呢？他们明显促进了电子学和计算机硬件的发展，但一些人争论说，工程师对软件的发展也同样做出了巨大的贡献。“软件工程”和“软件工程师”这两个词很流行，这表明计算机程序和软件包的开发是工程学的产物。但是许多软件开发人员在他们所从事的工作中很少看到工程学的影子：软件设计师不需要工程学位，开发简单的系统只需要运用极少的数学或基础科学知识。

然而，软件现在已成为世界上大多数国家的重要基础设施的一部分，它支撑银行业、零售业和医疗保健行业，并能更好地管理电力和供水等公用事业。一次信息技术上的失败可能会使非信息技术服务陷入停顿，每个人都有过这样的经历。因此，软件开发需要具有关键基础设施经验的工程师发挥其技能。事实上，正是用户在软件中的中心地位使工程学变得尤为重要。工程师开发的软件必须满足现有的需求或刺激新的需求，因此工程师必须知道如何更好地满足用户的需求和愿望，这一点在信息技术中与在建筑设计中一样重要。实际上，一些人认为，谈论软件工程的根本原因是希望软件开发能成为工程学的一个分支，并因此而

更加严谨。

为了能承担这一责任，软件工程师需要提升计算思维方面的技能，能够运用逻辑、算法和抽象方法来表示和分析他们将要创建的系统，这样他们才能设计出严密而强大的系统。他们学习使用UML（统一建模语言），以及如SQL（结构化查询语言）和Java等编程语言。但软件工程师还必须把正在开发的系统与用户的需求联系起来，因此熟悉客户需求，并能用清晰明确的日常语言把这些需求表达出来，与掌握开发的系统的形式同样重要。

蒂姆·伯纳斯－李、**HTML**和网络

许多人认为因特网和万维网是一回事，但其实因特网的出现时间比万维网早了几年。因特网的前身是美国国防部高级研究计划局于1969年受托研发的阿帕网（Arpanet）。阿帕网在美国不同的大学间建立了一个计算机网络，因特网就是要创建一个这样的网络，最终扩展到全世界。

早期的因特网可以在计算机间传输电子邮件，让计算机可以查看存储在远程机器上的文档。但是不同计算机之间存储信息和传递信息的方式缺乏一致性，不同的网络间存在不同的“协议”（计算机分解发送到互联网上的数据，并将接收到的数据重组的方式），因而阻止了一个全球网络的出现。蒂姆·伯纳斯－李（Tim Berners-Lee）的设想具有普适性：只要能连接到因特网，任何人都能在任一装有软件的机器上访问互联网上的所有可用的信息。

网络有三要素：一是URL，就是统一资源定位符，它形成网络上所有事物的唯一地址；二是HTTP，也就是超文本传输协议，指的是计算机之间相互通信、共享文档的规则集；三是HTML，也就是超文本标记语言，它描述网页在屏幕上的显示方式。通用地址系统是网络最基本的概念，有了它，所有的计算机都能在网络上找到各种文档，并能通过超链接将一个文档链接到另一个文档。正是由于有了这些链接，万维网才真正成为一个网络，任何文档都可以直接连接到另一文档。

尽管万维网影响巨大，但伯纳斯－李并没有从中获利。他的目标是创造一个不独属于任何人的系统，任何用户都可以把他们喜欢的内容放到互联网上，形成一个用于交流和合作的论坛。这一设想

出现的时间比万维网本身稍晚点，随着如博客、论坛和社交网络等用户生成内容的发展，这一设想才逐渐形成。

化学工程、材料科学与纳米技术

工程师不仅通过建筑和交通改变了世界，他们还调整并增添了物质世界的组成成分。化学工程和材料科学都是位于科学边缘的学科，它们研究的是自然界产生的物质的基本组成部分，并对这些物质进行改造，使其更适合人类的需要。我们生活的世界与我们祖先生活的世界截然不同，我们身边的和日常使用的很多东西都是由他们做梦也想不到的材料制成的，可实现的功能也是他们只能依稀希望实现的。开发供人类使用的材料并不是什么新鲜事，它贯穿了整个人类的历史。事实上，我们现在才知道我们的“远亲”利用材料的技巧背后的秘密，但通过工程学知识，我们可以利用这些技巧，获得更大的利益。

化学工程是把原材料转化为满足某些需求的物质的一门学科，其中许多物质对人们的日常生活至关重要。例如，为汽车和公共交通提供动力的汽油并不是直接从油井泵到加油站的天然产品，而是必须经过提炼才能使用的工业产品。化学工程师之所以能够做到这一点，是因为他们了解了化学家们所开发的物质的基本结构，以及化学家在实验室进行的实验过程，并将这些过程的规模扩大，以工业规模来生产和加工化工产品。

化学工程师的基本技能是能够“放大”在实验室中可创和可控的化学反应，这样就可以利用它们来创造人们所需的物质，并达到所需的数量。这不仅需要他们科学地认识被加工物质的性质，而且还需要掌握加工挥发性化学物质的方法，以便在大量处理这些物质时，最大限度地降低它们带来的巨大风险。这不是无关紧要的小事，因为在大量处理这些挥发性物质时，它们可能会有各种出乎意料的表现。

在这个时代，人们不再从井里或泉中取水，为了饮用安全对水进行过滤和净化是一个工业过程，这个过程在一定程度上是由化学工程师设计的。这项技能似乎在几十年前就诞生了，但将天然水转化成可饮用水，对一些国家来说仍是一个挑战。在一些国家里，疾病肆虐，基础设施薄弱，这些国家的目标就是找到生产安全清洁的饮用水的方法。在无法实施大型土木工程项目来修建下水道和清水管道的地方，化学工程可以在这一领域做出巨大贡献，为偏远或贫困的地区找到更廉价、更易行

的安全用水方法。

如今，有越来越多的食物是大规模工业化进程的产物，这个进程是由工程师设计的。世界上很多人的饮食中添加了大规模生产的食品，它们达到了特定的标准，而且保质期很长。从低脂蛋黄酱中的乳化剂，到酸糖果中的调味剂，不管是好是坏，人们的饮食已经被工程学彻底改变了。

医疗行业也是如此，药品已经从药剂师用杵和臼研磨而成变成了由大型制药厂生产，制药厂批量生产药品，服务于全球市场。医疗业所面临的特殊挑战是，在大量生产药物的同时确保所交付的每片药片或每颗胶囊中都含有适量的有效成分，因为即使是极小的差异也可能会对健康造成威胁。如果没有化学工程，世界上的广大人口就不可能获得大量安全且相对廉价的药物。随着这些进程的发展，人们有望找到治疗世界上一些最难治疗的疾病的廉价药物，这些疾病影响着世界上一些最贫困的地区。

许多化学工程师在石化行业工作，以满足全球对石油的巨大需求，但他们无疑将在开发石油替代品方面发挥核心作用，包括开发氢燃料电池，许多人认为氢燃料电池是化石燃料的清洁替代品。

化学工程师必须掌握的核心概念之一是传质，即一种物质以什么速度、在什么条件下变成另一种物质。像水沸腾这样简单的物理现象涉及容器中的水蒸发到周围空气中的过程，化学工程师不仅必须掌握这种简单的变化过程，还要掌握许多复杂得多的过程。例如，在药品研发中，传质的概念很重要，因为了解以片剂形式交付的药物怎样释放到人体内并被人体吸收，以及释放的速度，对于生产能够在长时间内稳定释放低剂量的药物十分重要。化学工程师应学习物质和能量的平衡和审核，也就是要了解一个过程中物质的输入、输出与这一过程所用能量之间的关系。化学工程师控制这些过程的方法包括对这些过程进行数学建模，以便能抽象地理解和分析这些过程；还包括项目管理和流程模拟，以便管理和控制实际的过程。化学工程师可以极大程度地使用软件为系统建模，对他们设计、实施的过程进行模拟。

与化学工程紧密相关的是材料科学。虽然化学工程主要是提炼天然物质，但化学工程和材料科学也致力于增加世界上材料的种类。人造材料是科学应用于工业的产物，这份材料清单几乎是无穷的，生活中因新发明的材料而得以制造出来的重要物品清单也一样。材料科学家及工程师熟悉物质的分子和原子结构，从而生产出在宏观层面上具有理想性能

的材料——重量轻的、荧光的、结实的、抗污的、可塑的或抗菌的材料。设计的材料可以防止煎蛋粘在平底锅上（聚四氟乙烯），可以制造更轻便的交通工具，如赛车、更节能的飞机等（碳复合材料），可以提高人类在运动方面的表现（速比涛鲨鱼皮泳装曾在2008年奥运会上帮助运动员打破多项世界纪录），可以修复破损的身体部位（髋关节等假肢中耐磨的生物相容性材料）。工程师们面临的挑战是找到一种方法来制造具有理想性能的材料，这种材料能在实际应用中发挥作用，而且能安全制造，成本合理，从而具有商业可行性。

不仅仅是全新的材料才有望实现革命性的应用。纳米技术是材料科学的一个领域，它利用的是材料在非常小的尺度上出现的特性，这些特性与大尺度上的同种材料的特性截然不同。人们感兴趣的尺度范围在0.2到100纳米之间，其中1纳米是1米的十亿分之一，大小在这个尺度范围内的自然物质是病毒和DNA链。由于微观世界中的量子力学效应，当物质处于这些微小尺度时，它们的表现会有很大的不同。例如，纳米大小的黄金粒子有不同的颜色，比如红色或蓝色，事实上，纳米粒子的这一特性无意中被用于制作彩色玻璃已有几个世纪了，而人们最近才获悉这些效果是如何产生的。

纳米技术就是通过控制纳米尺度上物质的结构来设计和制造人工产品，它的应用范围很广，从化妆品到飞机涂料。在化妆品中，纳米大小的二氧化钛颗粒被用于防晒霜中来提供防护，这样的防晒霜不像老式防晒霜那样不透明、发白。在飞机涂料方面，纳米技术让使用更薄的涂料来减轻飞机的重量成为可能。碳纳米管是一种非常窄的圆柱形管，因为它在这个尺度上表现出了良好的导电性能，所以它的应用范围很广，从比碳复合材料性能更好的耐用轻型复合材料，到更亮、更清晰的显示屏上都有应用。

纳米材料可能会渗透到我们的世界中，但它们可能不会引起我们所预期的革命，许多纳米增强产品（如防晒霜）是在很多人没有注意到它们的纳米状态的情况下推出的，还有许多其他产品已经存在了几个世纪了。纳米技术可能真正会影响的一个领域就是电子行业。纳米技术把电子技术提升到微型化的水平，其器件体积可以达到传统半导体器件的1/1000。电子纳米器件包括新型低能耗照明设备，它们使用碳纳米管和高效太阳能电池。

生物医学工程：成像、修复与监控

近几个世纪以来，世界发生了重大变化，其中的一个变化是，许多人舒适地在世界上活得比以往更久。人们的平均预期寿命延长了，这常常被认为是人类知识和成就取得进步的证明。当然，医学是这一发展进步的核心，工程学虽然也在其中起了重要作用，但其作用常常被忽视。工程学的部分贡献来自前文所描述的成就：工程学改善了人们的生活条件，如清除疾病滋生的污水，提供洁净的水，为住所供暖等，这使许多人更长寿。然而，在预防和治疗以前的不治之症和致命损伤的医学使命中，工程学也起着核心作用。没有工程学的介入，现代医学的存在完全是无法想象的。

生物医学工程不仅在科学上取得了进步，还将这些进步应用于医疗保健的各个阶段，从诊断到治疗，再到长期健康监测。生物医学工程师设计、安装和维护用于医疗的产品和系统，从肾透析机到假肢。虽然我们不可能概述技术使现代医学取得的所有进步，但我们可以看到工程学在医治病人的关键阶段所做的重大贡献。

疾病的成因或损伤经常隐藏于身体深处，在活人身上查找疾病的成因是一个难题，只能依赖病人陈述的症状和肉眼检查来推断，或用探查性手术来解决。如果无法了解详细的病因，不仅诊断会是推测性的，而且治疗也会不准确——如果在病人进入手术室之前无法看到病变之处，那么切除病变会有些困难。

所幸的是，人体成像技术彻底改变了诊断过程。很少有人在一生中从未做过X光检查，因为X光检查是用来鉴别骨折、牙齿发育不良和肺部炎症的。虽然X射线是由著名的物理学家兼化学家玛丽·居里发现的，但是，是工程技术研发了医用X射线诊断工具，并使它们变得更安全、更精确、更便携。同时，人们不断地开发这些工具，以满足临床医生的需求。工程师们还开发了更为复杂且伤害较小的人体成像技术，比如磁共振成像（Magnetic Resonance Imaging，简称MRI），磁共振成像扫描清晰地显示了人体的不同组织类型，区分了骨骼、脂肪、肌肉和肿瘤等。磁共振成像得以实现，是通过了解和应用磁性以及原子在占人体很大部分的水中的量子力学性质，这一基础科学的应用使肿瘤能被诊断出来。随着功能性磁共振成像仪的开发，我们可以更好地了解人体的工作原理。人体成像并不局限于发现潜在的疾病，比如说，利用超声波成像胎儿的发育过程，消除了怀孕过程的许多谜团和恐惧。这也说明，工程学在一个人出生前，就已经为他的健康做出了贡献。

如果这么多人体成像设备中有一个检测出了疾病，那么就可能需要

进行手术，由于工程学的干预，切除病理组织的手术技术已经有了显著的提高。微创手术可以在创口极小的情况下切除病变组织，减少形成瘢痕和发生术后并发症的可能性，并加速术后恢复。微创手术是把摄像机同手术器械一起送入病人体内，在摄像机的帮助下进行的。外科医生借助屏幕上的图像，能够在不打开病人身体的情况下在病人体内进行手术。由于这一外科手术领域的进步，外科医生将能够使用越来越精密的仪器，动作比手最灵巧的外科医生还要精细。其中一项特别的改进是研发出了可以像蛇一样移动的器械，可以灵活地深入人体内部进行手术或诊查。运用这样的器械可能不需要有外部切口，它们可以通过人体的自然腔抵达要治疗的部位。[4]

医疗保健的改善意味着人们可以活得更久，因此更多的人会遭受老年疾病的困扰。医学工程有望为老年人提供更多的支持，其中一个核心是开发远程监控手段。利用通信技术，临床医生能够监控身在家中的病人；借助越来越小的监测设备追踪患者的身体状况，并把关键信息发送给医生。例如，可以设置一种装置，为病人定期测量血压，并将读数传给医院的临床医生。病人家中的传感器可以追踪病人的日常活动，因此，可能由疾病或在家中跌倒导致的不寻常行为便可以引起医生或护理员的警觉。这可能会改变许多病人或老年患者的生活，使他们能在医生的监督下过上正常的生活。

生物医学工程师必须对工程学原理和人体生理学有所了解，生物医学工程融合了这两个领域，工程师必须精通这两个领域，以便设计出能够治愈人体的部件，或者学习一种工程学的方法来认识人体及其出故障的方式。生物医学工程涉及的工程学领域很广泛，机械工程、电气工程和材料科学都发挥着重要的作用。例如，在替换肢体和人工心脏等人工假体的设计中，它们都扮演着重要的角色。生物医学工程可能与医学一样丰富多样，生物医学工程师要专门掌握上述的所有领域的知识，从人体成像到手术机器人，再到生物系统建模。在这些领域中，生物医学工程师都将与临床医生密切合作，以确保他们的工程专业知识转化为对病人的治疗护理知识。

仿生手

仿生的假肢比真人的肢体更好的这种图景，仍然是一个遥远的梦想。事实上，在相当长的一段时间里，假肢，尤其是手的假肢，依然是笨重和迟钝的代名词，最有效的假肢往往是简单的爪状装

置，虽然对病人很有帮助，但绝不能代替手及其各种动作。

这个领域取得的一个重大成就是仿生手的发明。这一发明在2008年获得了英国麦克罗伯特奖（MacRobert Award）。仿生手的革命性在于这只手的每根手指都有独立的功能，能够独立活动，而且活动范围大，触觉灵敏度高，它由手臂上残留的肌肉发出的电信号来加以控制。据报道称，病人很容易操作仿生手，并且仿生手相对较轻。它模仿人手的动作，用关节包住物体，适应其外部轮廓，并用适当的压力抓握物体的表面（见图2-2）。



图2-2 仿生手

无假体皮肤覆盖的仿生手在展示有独立功能的手指。资料来源：《触摸仿生学》（*Touch Bionics*）

仿生手的发明标志着生物医学工程在治疗截肢患者方面取得了突破。通过应用机械工程、电子工程，并借助材料的发展，制造出有更接近人类皮肤外观的仿生手，并凭借与皮肤相似的表面增强抓握力。对接受假肢的患者来说，其重要意义无疑在很大程度上是手的功能性。同时，但有一个外观和动作都像人手的假肢对病人的心理也有好处。在生物医学工程这一领域，工程师能对人们使用身体的能力和认知观念产生深远的影响。

章后总结

- 土木工程建造供水和排污的管道，保障了人们的健康生活；还建造了交通系统，促进了人们的出行和交流，对工业、通信、邮政也至关重要。土木工程建造的多种设施对于人类文

明发展有至关重要的影响，但也面临设施维护、环境影响等多种问题。

- 结构工程关注对结构进行设计和施工，将分析方法应用于结构设计过程。结构工程创建了世界上一些最为引入注目的人造地标，还改变了现代城市的面貌。
- 机械工程利用自然力量把天然燃料转化为有用功。蒸汽机的发明是机械工程史上的关键点，它推动了工业革命，并促进了热力学、流体动力学等学科的发展。机械工程在交通工具方面的发展，对现代世界的面貌和运行方式产生了不可估量的影响。
- 电气工程负责设计和制造由电力驱动的设备，以及能够传输和分配这些设备的电力的系统。电气工程在发电、输电和电机方面打下了坚实的基础，参与创造了现代城市的精髓。电气工程越来越专业化，产生了新的分支学科——电子学。电子学结合了物理学和工程学，塑料电子学的进展在如今继续创造新的变革。
- 信息与通信技术极大地方便了人们的交流，缩小了世界，同时又创造了虚拟空间，扩展了世界。计算机改变了许多人的生活，创造了新的就业机会。计算机的普及导致了全面快速的通信及计算技术革命。
- 工程学不仅通过建筑和交通改变世界，化学工程、材料科学和纳米技术调整并增添了物质世界的组成成分，在净水、食品、制药、化工、石化行业、人造材料等领域改变着人们的生活。
- 生物医学工程师设计、安装和维护用于医疗保健的产品和系统，将科学应用于疾病的诊断、治疗、长期健康监测等各个阶段，为医疗做出了重大贡献。
- 每个单独的工程学科只能产生有限的影响，各种专业之间的界限很模糊，最重要的工程项目通常需要多个学科之间的合作。

A BEGINNER'S GUIDE

ENGINEERING



工程师的思维与方法：工程学的核心要素

工程师怎样工作？

工程师如何思考？

工程师需要处理怎样的问题？

工程学有哪些特性？

本章将通过考察工程师的工作方式、工程学的核心概念和工程师的思维方式来审视工程学的本质。本章将确定贯穿所有工程实践和研究的主题，只有掌握了这些要素，工程师才能够处理他们必须处理的各种复杂问题。

发明、创新与制造：从概念到现实

人们对发明家的刻板形象是一个独自设计出创意性大过实用性的装置的人。然而，工程过程通常与此截然不同。爱迪生传记告诉我们，即使他是世界上最著名的发明家之一，也不是靠在工作室里独自经历的灵感闪现而成功的。相反，他的发明应当归功于一个工程师团队，他们专注于寻找问题的解决方案，愿意通过反复实验来检验设计。

发明是工程学的一个关键要素，但通过发明的方法，工程学对创新过程做出了更大的贡献。《牛津创新手册》（*Oxford Handbook of Innovation*）这样区分了发明和创新："发明是新产品或新工艺的想法第一次出现，而创新则是在实践中第一次尝试这种想法。"创新就是通过商业或其他方式把想法变为现实，把早期的原型从绘图板上送到用户手中。创新是个人、企业和整个社会获得成功和财富的关键。事实上，正是爱迪生作为创新者取得的成功使他在历史上占有一席之地，因为他的发明总是以商业开发为目的，他致力于向国内客户提供分布式电力和电灯。由于创新被奉为经济增长的关键，因此国家鼓励创新。

创新并不是工程学所特有的，事物的任何改变，只要能成功地运用到实践中去，都可以被理解为是一种创新形式。零售、医疗保健和银行业都鼓励创新，但工程学对创新有巨大贡献。工程学的一项核心活动就是把科学研究所揭示的可能性转化为可生产、分配、出口、销售和使用的实用产品，工程学的核心就是将可能性转化为现实，因此，它的核心是创新。

这个创新过程包含了很多阶段，所有的阶段都需要一定程度的工程投入。研究与开发是利用"纯"科学所做的基础研究，为创造新产品而进行应用或定向研究。开发是通过构建原型、测试和完善，把产品微调为真正有用的东西的过程。许多工程研究包括研究与开发两个方面，它们致力于生产有用的东西，而不是在学术期刊上发表有趣的成果。

也许工程学历史上最重要的贡献是开发了制造工艺，这样就能更快

速、更高效地生产设备和产品，如果没有足够经济、快速的制造工艺，任何已发明的产品都不可能从发明走向创新。工程学一直是开发大规模生产制造工艺的核心，大规模生产既始于开发制造工程产品部件的工艺，使部件可以实现通用互换，还始于开发使制造过程自动化的车床，这可以提高大规模生产的速度，减少对熟练劳动力的依赖。

马克·布鲁内尔（伊桑巴德·金德姆·布鲁内尔的父亲）和亨利·莫兹利（Henry Maudslay）组建的团队在大规模生产的历史中扮演了重要的角色。由马克·布鲁内尔设计的用于制造船舶滑轮的工艺取得了重大突破——滑轮以前需要技艺熟练的工匠手工完成，但马克设计了一个自动化流程，其中只有极少部分需要熟练的工匠完成。亨利·莫兹利实现了马克的设计，他将这一方法付诸实践。他们取得了巨大的成功，位于朴次茅斯（Portsmouth）的滑轮制造厂的生产速度达到了以前的10倍，而且每个滑轮的外形和质量都一样。遗憾的是，这种制造上的成功并没有带来财富，因为滑轮的买家——英国皇家海军拖欠了货款。马克也遇到过类似的困境——他设计了一种机器，可以快速为士兵生产高质量的靴子。

马克·布鲁内尔的贡献并不在于他对产品的设计做了重大改变，而是他对靴子和滑轮的生产方式进行了变革，使它们的生产变得更容易、更快速。亨利·福特在汽车领域也产生了类似的影响，福特的名声并非源于他在汽车发明中所起的关键作用，而是源于他为将汽车推向更广阔的市场做出的巨大贡献，因此，他是汽车革命的核心人物。在这场革命中，汽车成为发达国家越来越多的人的交通工具，汽车行驶对基础设施的需求还影响了城镇规划。福特的动力就是要非常简单快速地制造他的福特T型车，让工人都能买得起。

生产线和生产线上的工人是福特在制造业上创新的关键，他的方法是只生产一种型号的汽车，并实现装配过程自动化，这样就可以在不需要工人的情况下快速组装。福特利用机器制造标准化的可互换部件，他还运用了劳动分工的概念，分解组装汽车的工作，让每个工人只需重复完成一项小任务。这种工人角色的自动化不断得以调整，速度变得更快，其方法是创建一条装配线，装配线上的每个工人都完成自己的任务，这样他们就不用在自己的工作台上工作，而是在装配线上工作。在装配线上，要组装的汽车部件会在固定的间隔时间内从一个工人处移动到下一个工人处，给每个工人足够的时间来完成他们的任务。由此，工人就成了汽车组装的机械系统的一部分，虽然他们没有技能，但操作准确，效率很高。

福特给工人们支付了高于业内平均水平的工资来奖励他们，和他们一起分享T型车带来的财富。这是他设想的一部分，他的设想是生产普通大众都能买得起的车，丰厚的薪水也使他能够为自己的产品创造市场。要找到工人在他的装配系统中发挥作用，这样的手段是至关重要的，因为极其简化的装配角色是单调而无情的，对一些工人来说几乎是精神上的折磨。然而，对福特汽车的需求，以及该装配系统满足需求的能力使相同的模式在市场上保持了19年。

装配线并不是制造业进入现代世界的唯一途径。日本和瑞典这两个国家尝试了两种不同的模式，一种是允许工人改变任务，另一种是让一小群工人完成整个产品。同一款产品并不适用于所有地方，同样，相同的流程并非在所有地方都能生效，创新、制造乃至营销都与特定时期特定社会的需求和习俗密切相关。

在未来，人们可能会从大规模生产转向小规模生产。快速成型是指一次性或小批量地制造物品的过程，这个过程通常类似于打印过程：在收到构建特定工程产品的指令后，3D打印机就会堆叠一层层薄薄的塑料，逐步构建一个三维物体。这个过程的优点是可以快速创建原型，而不是在与有合适设备的制造商联系后，通过机械加工过程来构建原型。

最初，快速成型只能使用塑料，但随着使用包括金属在内的不同材料“打印”物体后，快速制造已经成为现实。通过同样的过程，制造出来的不仅仅是一个塑料样品，而是成品了。这个过程的潜力在于，有可能创造出具有小众市场或分散市场的产品，这些产品不需要大规模生产，可以在没有昂贵的专业设备的情况下进行。快速制造产生的废物比通过去除材料创建所需形状的机械加工过程产生的废物要少，而且还可以用来制造机械加工不可能创造的物体，例如一个中空的固体物件。像大规模生产一样，快速制造也可能在制造业中引发变革，逆转从家庭手工业到大型制造工厂的趋势，使制造业回归小规模生产，同时还能带来标准化、自动化和不依赖专业技能的益处。

谷歌：一次工程创新？

作为在互联网占主导地位的搜索引擎，谷歌的发展是一个创新的范例，它的成功是无与伦比的。尽管拉里·佩奇（Larry Page）和谢尔盖·布林（Sergei Brin）这两个谷歌背后的人物不是工程师，但与促使谷歌成功的那些发展与工程创新方面的发展类似。

谷歌之所以成功，是因为利用了应用数学来解决因特网和万维网发展所带来的问题，也就是寻找与个人兴趣相关联的网站。佩奇和布林想到，搜索结果可以按照网站的受欢迎程度排序，这样最引人注目、最受欢迎，因此也最为相关的搜索结果就会上升到首位。他们认为，从其他页面链接到某一网页的链接数量将会是受欢迎程度的关键指标，因此他们开发了网页排名（PageRank）算法来对网站进行排序。该操作根据链接到网站和页面的页面数量、链接到它们的站点的网页排名，以及它们是否只是链接到它们的页面上列出的少数几个或多个站点之一，来对网站和页面进行排序。

一旦证明了该算法的有效性，便需要有强大的计算机能力在整个网络内执行该算法。为了扩展最初的搜索引擎，佩奇和布林收集了大量谷歌团队为此自行组装的个人电脑。谷歌不仅仅是一种搜索方法，也是能进行搜索的物理硬件。

佩奇和布林是创新者，他们想出了一个绝妙的主意，一种在网络上找到最相关网页的方法，并使其能在不断发展的网络中发挥作用。这个创新可以看作是工程上的成功，因为它确定了可以解决现实世界问题的数学结果，并建立了物理系统来实施这个解决方案。将谷歌与马克·布鲁内尔和莫兹利的制造创新进行比较，我们发现，他们都是先确定一种需求，接着构想和设计了一种方法，并制造定制机器来满足这种需求。

科学、数学与计算：建模、预测、测试

任何工程学科的学位在很大程度上是通过研究该专业的科学背景和该领域的数学实践而获得的。随着工程学的发展，人们对工程结构和机械运行方式的认识不断加深，每个工程师都有责任了解一代又一代工程师从成功和失败中辛苦得来的知识。因此，公认的工程科学和数学分析方法是所有新工程工作的起点，为创建安全、实用的产品或系统提供指导。

数学已经成为工程师使用的基本表示方式之一。以运用流体动力学的机械或航空工程师为例。在计算流体动力学领域，纳维 - 斯托克斯方程（Navier-Stokes equations）是一组功能强大的方程，这些方程可以描述许多流体动力学过程，如飞机或汽车在空气中的运动。运用这些方程，工程师可以确定某种形状的飞机在各种条件下的性能。这样的方程

组使工程师能够描述他们感兴趣的属性之间的关系，为描述系统和结构的运行提供了一种通用的抽象方法。工程系统的数学描述方式不同于一般的语言描述，它更接近于精确制订的计划。工程师谈论系统的数学建模时，用数学关系来表示工程系统，这类似于建立该系统的物理模型。但是，数学模型不是在三维空间中表现系统的特征，而是在可能性的空间中表示系统，并允许对系统进行探索，以研究系统的运行情况。

数学不仅是工程学的一种描述手段，也是预测系统行为的一个必要工具。运用纳维 - 斯托克斯方程来预测某一特定翼型的性能，要比为所考虑的每一种方案建立和测试原型有效得多，而且成本更低。在结构工程中，了解材料的属性，如材料的抗应力和应变能力，可以对不同结构中的材料进行数学分析，以确保这些材料能够经受结构所承受的力。这些数学工具提供了一种方法，用于运行各种设计方案，评估哪个方案能发挥最佳作用。

飞机在飞行过程中不断受到压缩和减压作用，导致机体疲劳，金属机身产生细小的裂纹。如果这些裂纹突然变大，就可能会造成严重故障，导致飞机坠毁。工程师需要知道哪里有薄弱环节，以及如何调整机身设计以防止损毁。有限元分析是一种数学方法，可以使工程师了解结构在荷载作用下是如何变形的。该方法的工作原理是在被检查的结构中构建一个网格，然后根据网格中每个元素的属性和行为推导出整个结构的可能行为。通过比较从一个元素到下一个元素的残余应力，工程师可以很好地了解裂纹形成的位置。如果工程师能够预测飞机结构中应力集中的位置，那么他们就可以花更多的时间来改进那些薄弱环节的设计。

数学在工程学中很重要，它不仅能预测结构是否完好或者机器能否运转，而且能证明事实就是如此。在许多情况下，纯粹根据经验进行的工程学实践可能相当成功，工程师应用的一些数学知识在很大程度上可能只是对工程师做过的事情进行的数学描述。但工程是为别人做的，工程系统会有操作员和用户，如果要用户信赖交付的工程，那么演示工程系统的功能和安全性的能力是必不可少的。在工程学中，将数学关系中的经验编纂归类，并利用这些经验证明设计的有效性，这种能力是至关重要的。数学在工程学中的应用表明，工程学不仅仅是精练的常识。有时系统会以意想不到的方式运行，如果有严谨的行为建模的方法，那么就可以显示它们为什么会这样运行。

在工程学中，数学是一种工具，是工程师用来辅助设计和测试的一种方法。对数学家来说，数学关系可能是美丽迷人的，但对工程师来

说，数学关系只是一种达到目的的手段。工程师们的数学计算有时可能有点混乱和复杂，因为他们是为现实世界的现象建模，而不是表现一些理想化的、纯抽象的数学关系。例如，在建立湍流模型时，纳维 - 斯托克斯方程很难求解，而这显然是工程师特别感兴趣的现象。因此，对于工程师来说，知道数学失效的地方或仅大致适用的地方，与知道数学完全适用的地方一样重要。

几十年来，工程师都必须借助计算尺和削尖的铅笔来模拟工程系统的运行情况。如今，基于计算机的模拟使工程师能够进行更广泛的模拟，模拟更复杂的情况，并且常常能够执行对个人来说太困难或太费力而无法自己完成的计算。例如，计算机程序使计算流体动力学变得容易了很多，这些计算涉及许多参数，如果纯靠人工计算的话，一名工程师可能需要几天甚至几周的时间才能完成。[1]

计算机模型还可以代替大量的物理实验，减少设计过程中的时间和成本。计算机辅助设计（Computer-aided design）现在是工程设计师使用的一个基本方法，利用计算机辅助设计，工程师能够创建三维模型，可以在屏幕上进行分析，简单而快速地进行修改。CAD软件包提取了设计工程师的专业知识，工程师可以利用经过试验和测试的解决方案来构建计划，而不用从零开始。CAD的开发使工程师们能够设计更为复杂的结构，因为一旦利用CAD创建了设计方案，就可以通过运行模拟来进行测试，分析该方案在各种不同情况下的性能。

软件工具的运用极大地扩展了工程师的技能和思维能力。由于它们拓宽了测试范围并增加了测试细节，因而无疑也有助于提高安全性。有人担心，依靠计算机进行计算和设计会给工程师带来威胁，他们会失去体验的机会，从而无法培养简单地判断对错的能力。基于计算机的计算也可能被认为缺乏明显的数学证明的严谨性，因此无法证明工程系统的安全性或功能性。但是，就像数学一样，软件只是一种工具。一名优秀的工程师应该知道使用哪种软件、运行哪种模拟系统，他能判断出一张华丽的CAD绘图是否完全正确。工程师知道CAD结果背后的近似值和假设，并且知道这些结果何时会受到质疑，经验总是会有作用的。

工程设计：从需求到解决方案

工程设计对工程产品的规范进行系统、智能的生成和评估，这些工程产品的形式和功能达到了既定目标，并满足规定的约束条

件。[2]

根据许多定义，设计是工程学的本质。然而，设计也可能是工程学的一个方面，它不能简化为数学形式，因为设计是一个创造性的过程。上面引用文字的已暗示，设计是为新的工程产品和系统而产生的想法和计划。工程设计关注的是它所要解决的现有问题，但设计是自由的，因为没有预先设定的、唯一正确的，甚至客观上最佳的设计来满足特定的需求。多年来，工程设计一直没有被包含在工程教育中，许多工程师认为这是因为工程设计很难教。尽管老师可以站在讲台上，从头到尾讲解纳维 - 斯托克斯方程的应用，但如何讲授创造力呢？老师如何向学生描述他们想出新颖、有趣且成功的设计的过程呢？在很大程度上，这是无法做到的。工程设计必须通过实践而不是理论来学习。然而，这并不意味着工程设计是一个完全自由的非理性过程，工程设计实践中存在诸多制约因素，各工程领域的设计过程也有着许多共同的关键特征。

工程设计不是一个自由表达的过程，它受到各种外部因素的高度制约。工程设计有一个既定的最终目标，根据这个目标来测试设计方案。对工程设计人员而言，难题正是从设定这个目标开始的。如果一名工程师正在为客户设计一款产品，无论是一种新型飞机的舱门，还是体育场的分层座位系统，工程师都必须从客户那里获取需求，其中包括设定该设计特别需要达到的目标（就飞机舱门而言，可能需要舱门不能被意外打开，这样在飞行中才安全，但在紧急情况下必须很容易打开）、最终产品的成本、各种对尺寸和重量等的限制，以及使用条件（这决定了什么材料合适）等。

为设计项目设置需求的过程可能会充满困难，出错的概率也很大。不了解工程过程的客户总是不能确定最重要的需求，或者那些在工程上可以实现的需求。工程师可能对如何解决客户的问题有很好的想法，但实际上却没有正确把握手头上的真正问题。客户脑中的需求可能是以模糊的普通语言形成的，而这一需求进入工程师脑中时，必须转化为数学和材料科学的专门用语。通过半心灵感应的过程了解客户脑中的需求，并转化为工程师脑中的需求，这一过程很容易出错。有些工程师专门在大型项目中充当这一角色。

需求说明是一种正确识别客户真正需求的技能，这样客户的需求可以很容易地转化为技术解决方案。需求说明包括，确保客户想要的东西是可以实际交付的，也就是可行的（特别是涉及软件时，人们经常会提

出一些技术上不可能实现的要求。他们高估了当前的技术水平及其所能交付的产品）；在时间和预算限制内是可能实现的；最重要的是，询问客户要求的是不是正确的东西——通常一个需求可以通过另一个更经济、更简单的，或许已经存在的解决方案来满足。这是一个反复的过程：把可能的解决方案反馈给客户，让他们根据自己的需求进行考量，然后根据客户的反馈调整解决方案。

确定设计项目的需求与概念设计阶段同步进行，在概念设计阶段，需要考虑解决问题的一般方法。设计的项目越新颖，这个过程就越长、越自由。设定了需求并证实了概念后，随之而来的就是更详细的设计阶段，这个阶段包括为工程产品及其制作材料指定特定的形式和结构。最终会制定出一组规范，规定了最终解决方案必须具备的特性——它的功能、成本，以及诸如重量、使用材料之类的参数。

制定规范之后就要进行可行性研究，其中包括对设计进行各种测试：使用上述数学模型或计算机模型的分析测试；在物理模型上进行实验；构建一个原型，根据初始需求对该原型进行测试。在大多数工程设计中，这是一个反复的过程，设计之后是测试，测试意味着对设计进行改进，然后需要进行更多的测试。如果设计理念不能成功地解决最初的问题，则可能需要重新开发设计理念；如果原型的执行方式存在明显的缺陷，那么可能需要改进详细的设计。在设计过程中的这个阶段，不同的工程产品会有不同的发展，有些设计会进行原型测试，但如船舶或建筑物等复杂的、大型的，而且通常是一次性完成的产品，不能进行原型测试。一旦完成了所有合理的测试，就要制造产品了。对于需要批量生产的产品，还需要设计实际生产产品所需的生产方法和设施。

然而，工程设计从未真正结束。即使是成品，也可以被看作是测试中的设计——任何产品都会出现“故障”，工程师会设法改进设计。这一点从围绕人们生活的技术中就能明显看出。并不是有人设计了一辆汽车，甚至是一个汽车部件，然后我们说：“是的，这很有效，很好，下一个问题。”这是一个连续循环的过程，基于工程产品的使用情况，制造过程的难易程度，是否有可能对其进行维护和修理……工程师的实验室延伸到了现实世界。无论有多少测试是在计算机模型或原型上进行的，但随着时间的推移，只要产品在实际状况中发挥了作用，那么这就是对工程设计的测试。正是在这个背景下，新的设计问题变得最为明显。

设计过程也是开放式的，有很多方法可以满足一组规范，设计师必须考虑各种各样的可能性，以期找到一个好的解决方案。这并不是说要

找到最佳解决方案，因为对于一个设计问题，从来就没有唯一的最佳解决方案。这些不同的考虑意味着满足一个需求可能会妨碍另一个需求，例如，让飞机舱门在飞行中更难打开，就可能需要增加舱门的重量。

也许正是因为如此，对于大多数工程产品来说，不可能只有一个人的名字，而这个人毫无争议地就是产品的设计者。设计是一个历史过程，几乎所有的设计都可以追根溯源，并受到已用物品的成功和失败的经验教训的影响，一种全新设计的新颖产品非常罕见，甚至一个工程师独自完成单个项目也几乎是不可能的。工程设计涉及多个学科，如设计飞机舱门需要考虑航空工程师最了解的问题（空气动力学），还有材料工程师（材料是否坚固、耐用、足够轻便）、电子工程师（门无疑要由自动控制系统来控制）等最了解的问题。每个团队在概念设计阶段可能会有数十人参与，在规范测试阶段可能会有数百人参与。如果团队由一个人领导的话，那么这个人就是设计经理，但也可能会有几个设计经理，分别监督一个复杂工程产品不同方面的工作。因此，工程设计是一个社会过程，其本质上包括团队合作、沟通和对用户的理解，而用户的问题正是工程师着手解决的。

詹姆斯·戴森和便利工程

工程学作家詹姆斯·亚当斯（James L. Adams）这样评论发明家："我所认识的成功的发明家对问题极为敏感，他们会注意到生活中的一些小麻烦或困难，而这些可以通过他们懂得的技术来解决。"[3] 这似乎是对詹姆斯·戴森（James Dyson）爵士很恰当的描述。戴森是艺术学院的学生，后来成了工程设计师，以双气旋吸尘器及其他发明而闻名。戴森这样评价自己："我的成功在于观察日常生活中的物品，人们总是认为这些物品是无法改进的。"[4]

某类工程设计师并不关心变革，不关心发明一种全新的工程产品来满足以前不可能满足的需求。相反，他们关心的是现有解决方案的不足，这些不足会给生活带来不便，而只要稍加努力，就可以得到大大改善。

戴森的第一个主要设计是改进了独轮手推车，这种笨重的装置在崎岖不平的地面上（独轮手推车通常在这种地面上使用）不能顺畅地行驶。戴森的"球轮手推车"创新地用球代替了轮子，球可以提供更大的表面积使手推车保持平衡，而且它可以从一边倾斜到另一边但不会翻车。戴森的球轮手推车与独轮手推车功能一样，看起来

也大同小异（当然，除了一个耀眼的橙色球之外），然而，通过改变发挥基本功能的部分，它比独轮手推车好用多了。

戴森的双气旋吸尘器的情况也与此十分类似，这种吸尘器的目的是履行真空吸尘器的功能。双气旋吸尘器看起来与真空吸尘器相似，但是戴森再次改变了核心部件的工作原理，使它的性能更好。戴森史诗般的设计、产品开发和测试过程是由对真空吸尘器的挫折感引发的：真空吸尘器一使用就失去了吸力。吸尘器袋上有微小的气孔，可以让空气排出，同时把灰尘留在里面。至关重要的是要把空气排出，因为吸尘器里的风扇不断排出空气，迫使源源不断的空气进入吸尘器中，即真空中。然而，即使是一点点灰尘也会堵塞气孔，拖慢整个过程。戴森的设计灵感来自从锯木机中吸出灰尘的气旋：锯木机顶部的圆锥体能吸收灰尘和空气，并通过离心力的作用，把灰尘吸附在锯木机的两侧，并过滤空气。戴森的目标是缩小这一过程，使之适合家用吸尘器——这种吸尘器可以像真空吸尘器一样过滤空气中的灰尘，但不会在这一过程中失去吸力。

戴森面临的挑战是开发出一种气旋分离器，能够处理家庭产生的各种灰尘和垃圾。模拟气旋作用的数学模型是存在的，但这些模型只描述了大小一致的颗粒的行为，而不是家中那些混杂的垃圾。由于没有数学模型能够处理真实污垢的复杂性，戴森通过对5127个原型进行测试，每次改变一个特性，从而开发出了他的吸尘器。最终的设计将一个气旋分离器封装在另一个不同形状的气旋分离器中，外部更大的气旋分离器吸走线绳和密封蜡，内部气旋分离器吸走细小的灰尘。

戴森的设计之旅中有一些有趣的事情。首先是起点——对目前解决日常问题的解决方案不满，认为这些问题可以更好地得到解决。其次是经验、物理原型和测试的重要作用。数学建模在对从桥梁到摩天大楼等大型工程设计进行虚拟测试中一直发挥着重要作用，但对于一些看似平凡的物体来说，实际情况太复杂，数学无法直接进行描述。双气旋吸尘器是基于物理学中很容易理解的原理来工作的，但是这些物理定律并不能简单地用来得出一种适用于家用吸尘器的方法。最后，虽然无法应用数学分析，但测试和改进过程仍然有条不紊：每次只改动一处，以仔细追踪哪些改动有效，哪些无效。

戴森的故事表明，工程设计可能基于科学原理，但它需要有创

造性思维，不断从经验中学习，才能创造出满足日常需求的设计。

系统和复杂性：涌现、不可预测性与人为因素

工程师越来越多地参与到系统的构建中，也就是说，他们并不专注于设计和制造一个工程产品（比如自行车），或者单独的工程产品的一部分（比如齿轮机构）。相反，他们参与的是复杂系统的设计，这些系统包含许多部件，每个部件都必须由专家开发，专家还必须着眼于如何将这些部件融入整体。

系统是由相互作用、相互联系以及相互影响的不同部分组成的整体。在工程系统中，这些部分通常会以不同的方式发挥作用，并属于不同的工程学科范畴。例如，飞机是一个包含许多部件的系统，比如机身、机翼、发动机、空气压缩系统，以及控制飞机的嵌入式信息技术系统等。每个系统都是由不同的工程师团队设计的，而且都涉及极为复杂的知识，但每个系统都必须互相关联。构成飞机控制系统的信息系统必须与控制起落架的机械系统以及发动机、门锁等相关联，很少有工程师能够清楚地了解每一个部件工作的细节。系统工程是工程学的一个分支，系统工程师专门从事复杂系统的设计和管理，其中涉及诸多因素，多个设计团队、施工团队和维护团队，以及多次失败和错误的机会。系统工程师有能力协调这些复杂的工程对象的各个部分。

工程师谈到系统时，他们也会谈到复杂性，这是工程系统的一个特征，该特征给工程师带来了特殊挑战。一个复杂的系统不只是一个复杂的系统：一个由很多部分组成的系统，这些部分之间的联系可能很难让人们去回想和追踪。一个复杂系统的各部分之间的关联使整个系统的行为大于各个部分行为的总和，各部分相互作用所产生的特征和性质不能由个别部分的性质或行为来解释。如果某物体仅仅是复杂的，以一架模型飞机来说，它仍然可以拆开并组装起来，整个成品完全是根据许多微小的部件以及它们的组装方式来定义的。然而，一个复杂的系统不能用这种方式分解成各个部分。它将具有所谓的涌现性，这是由这些部分的组合方式产生的。一个复杂的系统更像是一个蛋糕而不是一份沙拉，把所有的原料放在一起并不仅仅是这些原料的组合，它会产生一个产品，产品具有原料所没有的特性。

复杂系统不同部分之间的相互作用可以解释这些涌现性，这也给我们带来了一个挑战，因为我们并不总是确切地知道各部分将如何相互作

用，以及这些作用可能产生什么影响。系统工程学就是要了解系统的本质，以便设计出所需的涌现性，并尽可能排除可能导致系统失败的交互作用。

系统工程是设计和维护复杂系统的原则性实践。它源自国防部门。国防部门既采用高度复杂的技术，如具有上述系统所有特征的战斗机，又在涉及许多这些技术产物的复杂行动中使用这些技术，同时还在涉及许多参与者的精心规划的行动中使用这些技术。国防需要使用综合技术：战斗机携带着导弹，航空母舰又携带着战斗机；军舰不仅仅是一艘小艇的扩大版，它还具有多种功能，包括海上运输、运载其他车辆和弹药，以及作为军事行动的平台。因此，思考并设计具有相互关联的、技术多样化部件的系统，这种能力是现代国防不可或缺的。

系统工程并不局限于国防部门，随着技术的发展，许多领域需要系统思维。运输网络是复杂的系统，它们由如公路网等有形的基础设施、信息基础设施以及机动车本身组成。信息基础设施在监测道路上的交通状况，并将这些信息发送到路边显示器上发挥着越来越大的作用；机动车通过发动机管理系统把机械工程与软件工程结合起来。我们也谈论计算机或软件系统工程，而且系统思维在软件工程中变得越来越重要了。随着如交通网络、国家病人信息数据库等信息系统越来越多地支持人们的日常活动，软件必须被看作是由不同技术组成的系统的一部分，而且软件本身就是一个系统，具有从整理和比较数据到确保数据安全性等多个不同的（甚至相互冲突的）功能。

这些例子表明，系统工程的一个中心特征是它的跨学科性。系统工程师不能把自己定义为机械工程师或土木工程师，因为系统工程包括能够理解和领会所有工程学科中的工程任务带来的挑战。尽管系统工程师不可能精通从设计发动机到设计信息技术系统的所有事情，但他们必须对每个系统都有足够的认识，以便了解它们将如何互相作用，而且他们还要能够在发动机设计人员和软件工程师的工作之间建立沟通的桥梁。

系统工程师通晓多种工程语言。他们不仅能够理解不同工程专业的知识，而且能进行转换，还能够用一种通用语言表达所有这些专业的需求。系统工程师不会取代专家，尽管在许多情况下，系统工程师应该至少精通所讨论的系统的一个方面，但他们必须协调这些专家的活动。欧阳莹之称系统工程学为“对设计活动的设计”，因为系统工程师所做的就是进行规划，思考所有学科可以如何共同设计系统的各个部分，从而使整个系统成为一个连贯的系统，并能实现预期的功能。

因此，系统工程师必须从整体的角度看待所开发的技术，必须考虑整体，而不是一个又一个的部分，他们也必须考虑系统从出现到消亡的整个生命周期。工程系统的复杂性意味着，各部分之间的相互作用创造了一个整体，而这个整体不能仅仅按照它的组合方式来拆分。如果你发现来你家吃晚餐的客人不喜欢芹菜，你可以把芹菜从沙拉中挑出来，但是你不能把鸡蛋从蛋糕中取出。同样，系统设计阶段所描述的各个部分在构建过程中也是这样组合在一起的，如果有的部分不能正常工作或需要维护的话，是很难将它们取出来的。这也意味着在设计复杂系统时，进行改变并不容易，不可能改变一个部分而不影响整体。因此系统工程包括认识和管理系统的开发，并通过设计和施工来使用和维护系统。而且，系统的衰亡阶段也很重要，系统在其使用寿命结束时必须安全拆卸，这样它的部件才可以更好地被重复利用或回收，至少可以在不造成污染的情况下进行处理。工程系统生命周期中的所有阶段都必须在最初设计时就进行设想和规划。

上述讨论已暗示，许多系统的一个重要方面就是它们是社会技术系统。也就是说，它们把物理工程技术和那些操作、维护、使用或身处系统周围的人员结合在了一起。上述运输网络不仅包括道路、车辆、全球定位系统和路边警报系统，还包括司机和乘客。飞机不仅是由发动机、机翼、机身、嵌入式计算机控制系统和其他部件组成的复杂网络，还包括乘客、空乘、飞行员、空中交通管制人员和机场地勤人员。这些并不是被动的因素，而是系统中不可分割的主动因素，对系统的运行有很大的影响。司机对道路拥堵的反应决定了如何管理拥堵；他们对仪表板上的信息所做的反应决定了随着时间的推移，汽车的故障将如何影响其性能；飞机发生严重故障或坠毁时，乘客的行为将决定他们在事故中能否幸存。所以，人类行为对工程系统的功能和安全至关重要。

工程系统的设计、构建和交付也是一项社会事业，它受到系统各个部分所涉人员或团队的行为和互动的极大影响。以空客A380为例，它是2007年推出的最大客机，是全欧洲工程师团队合作的成果：它的机翼在威尔士制造，机身在德国制造，最后在法国组装。协调这样一个由不同地域、专业和语言的小组所组成的团队是一种挑战，与对飞机部件进行物理设计截然不同，但两种工作却密不可分。

把系统的技术部分和人员部分结合起来，对工程师来说是一项巨大的挑战，这涉及不同领域的知识，因为这两个部分受完全不同的定律支配——支配空气动力学的物理定律和决定人类行为的心理学定律（如果

有的话）。几个世纪以来，哲学家们一直在担心，看不见、摸不着的心灵如何与看似受物理定律支配的身体相互作用。社会技术系统的问题与这个问题十分相似，但规模更大，而且与身心问题不同的是，社会技术系统问题亟待解决。人们因为粗心引发的事故（开车时注意力不集中）或自然行为（疏散飞机上乘客时产生的冲动和本能）会给系统带来风险。工程师需要理解这些行为，或与理解这些行为的人合作，以便有效并安全地设计社会技术系统。

系统不仅仅存在于技术领域，系统思维也不局限于工程领域。上一章已经提到，人们逐渐认识到人体是由相互作用的部分组成的复杂整体，而不仅仅是细胞的简单连接，由此，系统思维正逐渐进入生物学领域。目前，对开发系统技术工程师的需求量很大，因为这些技术在管理从医院到金融机构的各种复杂系统方面非常重要。在日益复杂化、网络化和全球化的世界里，系统思维是一种非常有益的态度。

风险、不确定性与失败：把控未来

“结构工程是一门材料塑形艺术，它把我们并不完全了解的材料塑造成不能精确分析的形状，由此，我们也无法正确评估其受力，这样公众就不会怀疑我们无知到什么程度。”这段经常被引用来描述工程学特征的话，出自英国结构工程师协会苏格兰分会主席戴克斯（A. R. Dykes）博士在1978年发表的演讲。尽管这似乎是在讽刺工程方法，但它恰好揭示了工程实践的一个关键方面，那就是工程实践中不可避免的风险和不确定性。在讨论用于分析结构可能行为的计算技术的风险时，戴克斯特别谈到了结构工程。他认为结构工程仍然是一门艺术，而不是一门科学，不能简化为完全可预测和可控的原则，他的观点同样适用于工程学的其他领域。这个观点强调了工程学的一个关键方面，即工程师的工作常常带有很大的不确定性。

工程实践不像科学研究，科学研究是在实验室里，在严格控制的条件下进行的，实验者可以改变这些条件。工程实践则发生在现实世界中，现实世界中有各种影响相互作用，而且环境是新奇多变的，因此，工程师不能总是确切地预测工程系统在即将面临的所有情况下会如何表现。这种不确定性意味着，工程系统总是包含着一些风险因素，如系统可能无法正常运转，系统可能会彻底失败，系统成本可能会上升，以及系统最终可能会造成巨大的资金浪费。因此，工程的关键在于评估和管

理工程产品、流程或系统中固有风险的能力。

工程师所说的“风险”是什么意思呢？对此，有许多相关的概念需要加以梳理，以便了解工程师在考虑风险时的想法。风险应该与危险区分开来，危险是指一种物质或一个过程构成的威胁，例如核电站的危险是反应堆堆芯可能过热而引发火灾或爆炸，这是人们以前看到过的一种危险。然而，核电站运行的风险是，这种特殊危险可能会发生。因此，尽管有些人可能认为核电站是特别危险的地方，因为可能会发生各种事故，但是，因为发生这些事故的可能性相当低，因此，核电站的风险实际上很低。这可以与危险程度低但发生概率大的情况进行比较，例如，在繁忙的厨房工作的人被割伤或烧伤的可能性很大。但这并不是说，因为在厨房中受伤的可能性很大，所以厨房比核电站的风险更大。

除了特定危险发生的可能性之外，评估风险的一个关键因素是这种危险产生的影响。核电站爆炸的潜在影响非常大，可能会造成大面积土地污染，可能会造成人员死亡，并给周围的人带来严重的健康问题。因此，认为核电站更具风险是有道理的，因为尽管事故发生的可能性很低，但这类事故的影响远大于在厨房用刀割伤自己。虽然在厨房割伤自己的可能性很大，但这种风险是完全可以承受的。

工程风险通常是在存在大量不确定性的情况下产生的。一些极大的危险是由极少发生的状况造成的，例如核电站爆炸或建筑物倒塌。虽然在了解产生不良后果的事件发生的可能性的基础上，可以计算这些事件发生的概率，但是由于情况复杂，任何这样的计算都令人怀疑。幸运的是，这种低概率事件并不能作为风险统计计算的基础，因为这些事件发生的概率极低，因而无法确定它们发生的概率。有时潜在危险的性质和影响是不确定的，例如，如果核电站发生意外，导致辐射外泄，那么便无法详细预测辐射的影响、扩散的范围和持续的时间等。工程师必须应对这些不确定性，要么通过认识引发事故的过程来减少不确定性，要么在对预期风险采取行动时把这种不确定性考虑在内。

工程风险不仅包括事故风险，还包括财务和商业风险。在工程项目中，总是有失败的风险、超出预算的风险和不能按时完成项目的风险。工程师必须控制这些风险，因为承担一个几乎不可能完成的项目可能会造成很大的危害。例如，如果一个组织在信息科技系统中投入了大量资金，它就要承担风险。有一种风险是，该项目可能比最初预测的更复杂、成本更高。在这种情况下，成本既包括损失的资金，也包括系统运行不良产生的风险。交付这种系统的工程师和其他专业人员有责任确定

此类风险。

因此，工程师的一项关键工作是确定系统可能以怎样的方式发生故障。确定故障模式是管理工程风险的第一步，之后工程师可以采取许多对策来降低失败的风险。在土木工程和结构工程等领域，工程师必须评估结构在倒塌前能够承受的重力或应力，该结构要能够承受远远超过它在使用年限内可能面临的应力。举个例子来说，如果一部电梯的设计目标是承载10个平均体重的人，那么它实际的设计可能是承载30个平均体重的人，这意味着它设计的安全系数为3，即它的承载重量是预期的3倍。而且，工程师还得确定工程系统可能会以怎样的方式发生故障，这样就可以制订备份流程，即使出现故障，系统也可以继续工作。工程师应确保备份流程里没有常见的故障模式，也就是说，备份系统不应该像主系统那样容易受到同样问题的影响。

关键的一点是，工程师所设计的工程系统应该能够承受未来不确定的状况，正是因此，工程学不仅仅是简单的建造或修补——工程系统不应该只为在特定状况下工作而设计，而应该把它们设计成在各种各样的状况中都能运行，并且坚固可靠。如电网或电话网络等极为关键的工程系统，因为难以承受故障产生的影响，所以这些系统都设计成故障发生率极低的系统。

当然，这是最理想的情况，但并不是所有的工程系统都是完美的。失败是生活的一部分，只是工程师可能比其他人面临的更多。但失败也给工程师带来了一线希望，因为它们可以为设计中可能尚未察觉的薄弱环节提供经验教训，并为未来的设计提供指导。例如，飞机上的飞行记录仪是一种有用的工具，它能提供线索，说明飞机坠毁的原因，以及飞机坠毁是否由可避免的设计或施工失误造成。结构工程的知识在很大程度上与了解结构失效的原因有关，了解结构失效的原因才能建造出更坚固的结构。

关于工程灾难，以及从这些灾难中我们学到了什么或者应该学到什么，人们已经撰写了很多相关的书籍，如亨利·波卓斯基的《设计，人类的本性》（*To Engineer is Human* ）。一些特别的灾难，如“挑战者号”航天飞机失事，1981年堪萨斯州凯悦酒店（Hyatt Regency Hotel）的一条过道坍塌，在书籍和纪录片中都有详细的描述，目的是警告工程师和大众，有必要预见失败，并且在面对失败时果断采取行动。

工程师怎样才能避免工程系统的故障，降低其中的风险呢？工程师如何确定风险已经降低了呢？这些将涉及权衡的问题，因为降低风险通

常会增加系统的成本，有时还会增加系统的复杂性，这种财务风险必须依据安全风险来权衡。声誉风险也需要权衡——如果工程公司承担了风险，并发生了事故，将对该公司造成什么危害呢？工程师要采取的步骤在很大程度上取决于系统可以承受的风险水平。遗憾的是，确定这个水平并不简单。

工程师常常因自己对风险的认识与公众的看法不一致而感到沮丧。例如，一个人乘飞机旅行，即使是短途旅行，发生致命事故的概率也远远小于乘汽车旅行。然而，尽管人们乘飞机旅行遭遇事故的可能性极低，但他们还是认为航空旅行比公路旅行风险大得多，这主要是因为要考虑风险的性质方面。

人们对待风险的态度不仅取决于风险发生的可能性，还取决于其他的特征。人们可能害怕乘飞机旅行，因为他们不能像开车那样自己进行控制，也可能是因为航空旅行事故会带来灾难性的后果——在通常情况下，发生空难时，数百人会死亡。人们对风险的核心反应在于威胁的不可预测性以及不受控制性。也许正是出于这个原因，2005年7月伦敦地铁爆炸事件后，很多人开始骑车上下班。然而，骑自行车发生事故的可能性，尤其是对一个没有骑车经验的人来说，要远远高于卷入恐怖袭击的可能性。尽管如此，许多人仍然认为，承受他们觉得自己可以掌控的风险要容易得多。

工程师习惯于把风险简化为对事故可能性的定量评估，虽然对他们来说，这种态度似乎不合理，但是其背后的原因是可以理解的，那是常识理性的一部分。在许多应用程序中，工程师们必须以这些常识性的态度来对待风险，因为他们所处理的风险会影响公众。因此，会出现一些难以解决的困境。

在选择发展核能发电站还是化石燃料发电站时，必须考虑人们对造成灾难性后果的风险和长期以来许多危害较小的风险的不同态度。选择核能发电站可能会受到人们对灾难性事故的恐惧的影响，但优先选择化石燃料发电站则必须考虑这些发电站对气候变化的影响，随着时间的推移，它们会增加产生许多负面影响的风险。一定程度的风险对工程进展是必不可少的吗？风险可以降低到什么程度呢？

丹尼尔·古奇（Daniel Gooch）这样评价伊桑巴德·金德姆·布鲁内尔：“伟大的事情不是由那些坐着计算每一个想法和行动的成本的人完成的。”虽然风险无法避免，但人们普遍认为，工程师必须计算每个想法和行动的成本，在不认真对待风险的情况下，冒险是不能接受的。接下来

的问题是，一旦计算出成本，我们该怎么办。我们能够容忍多大程度的风险？我们应该花多少钱来消除风险？这类极其困难的问题将在下一章中进行探讨。

章后总结

- 发明是新产品或新工艺想法的第一次出现，创新是通过商业或其他方式把想法变为现实。工程学的核心是创新，通过创新制造出可生产、分配、出口、销售和使用的实用产品。
- 工程师利用数学方法描述工程系统、预测系统行为、证明预测结果。
- 工程设计的过程包括确定需求、进行概念设计、进行可行性测试，并在测试过程中和产出成品后不断改进。工程设计受到各种因素的制约，还涉及多个学科和团队的沟通和合作。
- 工程系统具有复杂性，涉及不同的部件、分支学科、知识、相关团队、诸多人为因素等。复杂系统的各部分相互作用使整个系统的行为大于其各个部分行为的总和，因此工程系统具有涌现性。系统工程专门从事复杂系统的设计和管理，系统工程师必须从整体角度看待所开发的技术，也必须考虑系统从出现到消亡的整个生命周期。
- 工程师的工作常常带有很大的不确定性，工程实践中总包含着一些不可避免的风险因素。工程的关键在于评估和管理工程产品、流程或系统中固有风险的能力。

ENGINEERING A BEGINNER'S GUIDE



工程学与社会

工程学如何塑造社会？

社会又如何塑造工程学？

工程学会产生道德争议吗？

工程师承担着什么样的责任？

本书第2章按照工程学塑造这个世界的方式概述了工程学的主要学科——从物理上改变自然景观，到把人类的足迹延伸到太空，再到构建虚拟世界。那一章所描述的变化显然并不局限于物质世界，工程学也彻底改变了许多人对世界的体验以及他们在其中的生活方式。交通网络和通信技术使世界变小，这一观点实际上与人们的感觉有关，因为如今长途旅行用时大大缩短，所以人们感觉世界就像一个紧密的整体。工程师创造了一个虚拟世界，使人们可以通过新媒体体验人际关系，开展日常活动，以新的角色和新的交流方式建立社会关系。

然而，第2章并没有深入探讨工程学是如何改变人们的生活方式和生活质量的。本章将探讨工程学如何塑造社会，以及社会和个人选择对工程学的影响，本章还将着眼于工程学的一些负面影响，以及它如何扰乱了人们的生活方式。工程师越来越敏锐地意识到，他们的工作影响广泛，几十年来，他们付出了巨大努力，为工程师和各个工程机构制定道德规范。本章最后将讨论工程师的道德职责，以及为履行这些职责他们要做些什么或者应该怎么做。

工程学如何塑造社会

人们的日常生活中充斥着各种工程学的产物，生活中的方方面面无不受到工程发明或工艺的影响。许多人家里有清洁的饮用水，能将污水排入相连的污水处理系统，他们的家里接通了电网，无论在白天或晚上，可以随时打开电灯或者电视，也可以通过电话和电子邮件联络同事和亲友，这些都是不折不扣的工程奇迹。

反思接通水电和建立通信基础设施给现代生活带来的变化，我们可以看出，工程技术对人类社会造成的深远影响似乎不亚于任何一场变革。曾经只有砖瓦和水泥连接的街道，如今变成了与电力、净水系统和通信网络相连的家园。回顾历史，为给居民提供必要的服务设施并对城市进行改造，人们居住的地方发生了翻天覆地的变化。

只要看看污水处理系统对提高生活质量的贡献，就能明白工程学对城市生活的影响。在开发污水处理系统之前，伦敦的居民因饮用了被自己的排泄物污染的水，而爆发了毁灭性的霍乱，由于不了解霍乱通过何种途径传播到饮用水中，人们没有正确认识到伦敦不完善的排污系统给公众健康带来的危害。不仅如此，伦敦的污水池溢出影响了整个城市的

大气。在1858年那个炎热的夏天，高温使流入泰晤士河的污水散发出难以忍受的恶臭，议会大厦弥漫着一股臭气，这意味着那些在伦敦污水问题上拖延不决的政客们不得不采取行动了。

工程师约瑟夫·巴瑟杰（Joseph Bazalgette）拯救了伦敦的污水处理系统。作为伦敦都市工作委员会的总工程师，他领导的项目停滞不前，因为伦敦的官僚们迟迟不采取行动。巴瑟杰设计的污水处理系统包括在泰晤士河两岸建造一系列主要下水道，这些下水道将由现有的引流至泰晤士河的溪流和排水沟形成。这些下水道设计为向东下倾，利用重力将污水排出城。泵站远离人口中心，将污水从较深的隧道中抽出，在退潮时排入泰晤士河，这样大自然自己的冲水系统就能把污水排入大海。到1865年，第一期工程完工，位于伦敦东南部克劳斯尼斯（Crossness）的泵站投入运行。第二期工程的标志是维多利亚堤岸于1870年开放。

伦敦市中心的特色是泰晤士河两岸宽阔的人行道，泰晤士河两岸指维多利亚堤岸和艾伯特堤岸，这两个堤岸位于把伦敦的污水排出城市的隧道上方的几米处。尽管只是治污工程，但沿河两岸形成了林荫大道，已然成为伦敦引人注目的景点。伦敦东部的泵站也是一道美丽的风景，装饰华丽，色彩鲜艳，它们证明了人们对污水治理工程的自豪。人们自豪于它的宏大，也自豪于它所取得的举足轻重的成就。当然，要改善伦敦特困居民的生活条件，还有很多工作要做，但伦敦的下水道建设表明，工程学能够对庞大群体的生活质量和寿命产生重要影响。

自伦敦开发下水道系统以来，已经过去了很多年，巴黎等其他城市也完成了类似的宏伟工程。尽管如此，现代供水和排水系统的变革作用尚未影响到世界上许多地方，一些贫困人口生活在没有基础设施，因而也没有卫生系统的非正规居住区，因此饱受因接触人类排泄物而引起的疾病的折磨。在这样的环境中，像伦敦和巴黎的那些大型工程项目是不适宜建造的。但是，工程师可以寻找方法，创造价格低廉、便携、性能强大的技术来处理废水，从而帮助解决贫困人口及其聚居地的特殊问题。[1]

工程学不仅可以改造现有的城镇，而且一些人口密集区也是由于工程学的发展而建立起来的。古代文明社会在富含水源或食物的地方定居，同样，现代城镇和城市也在工业发达的地区发展起来。随着煤和石油等天然燃料在工业中的大量使用，且集约化开采这些资源的方法得以发明，人口居住区抓住这些契机而发展和繁荣起来。开采石油的城镇和城市之所以得到发展并不仅仅是因为他们有这些资源，还因为他们有方

法大规模开采、提炼和加工自然资源，并利用这些资源创造一个产业。

交通运输的发展不仅把现有的居住区联系起来，也为新城镇的发展提供了条件。铁路城镇是在英国的“铁路热”时期发展起来的，像克鲁（Crewe）和斯温登（Swindon）这样的地方之所以能发展起来，是因为它们是许多列车停靠的站点或铁路连接的站点，这样就为很多企业提供了充分利用过往旅客的机会。在美国，横贯大陆的铁路连接了偏远的、以前从未有人涉足的地区，由于有传言称铁路将途经某一特定地点，人们匆忙在原本不适宜居住的地方修建了城镇。电影《西部往事》描绘了渴望从铁路上赚钱的投机者的狂热，当然，也描绘了一旦有机会发财就可能出现的腐败和暴力。工业和建筑业创造了自己的社区，例如工人居住的砂砾城市博尔德城（Boulder City）和加利福尼亚州气候宜人的硅谷。

当然，工业的发展不仅影响了人们的居住地，自工业革命以来，人们的生活方式也发生了巨变。通过制造业机械化实现的工业化过程无疑是对现代社会产生重大影响的因素之一。马克·布鲁内尔和亨利·莫兹利的创新所带来的发展致使家庭手工业走向衰落。在家庭手工业中，产品由熟练工匠少量生产，以满足附近社区的需求。工厂则相反，在工厂工作的工人，监督机器工作，作为自动化机器链中半熟练或非熟练的环节，在制造过程中执行离散的任务。前文已阐述过，福特汽车工厂就是这一转型的范例，它向我们展示了这些大型集中制造中心如何吸引工人，使工人们可以在离家很远的地方找到工作，还不需要特殊技能或培训。福特工厂有许多外来务工人员，1914年有70%的员工来自22个不同的国家。

在整个20世纪，自动化的进程持续进行，越来越多的制造任务被机器所取代，随着装配线机器人的兴起，在装配线上从事非技术性工作的工人越来越少。制造业发生的改变继续影响人们的工作和生活。现在最引人注目的可能是制造业向发展中国家的转移，而英国等国家的制造业水平则出现下滑。一个产业的消失可能产生与其诞生同样深远的影响：矿山和工厂关闭，附近社区的人们就会感觉到，曾经给他们带来凝聚力和丰厚工资的产业在消失。

工程技术的发展继续影响着人们的生活方式和工作方式。个人计算机的功能越来越强大、价格越来越低廉，通过宽带和无线连接的互联网逐渐渗透到生活中，这意味着经常在办公室工作的人在工作地点的选择上可能有更多的自由。在许多国家，制造业已经被所谓的服务和知识经

济所取代。在这种经济中，人们通过提供商业服务和销售创意，而不是制造“产品”来赚钱。在这种情况下，企业不需要在特定的区域办公，甚至员工们也不需要在同一地点一起工作。已经有很多人预测人们可能有一天会以一种不那么循规蹈矩的方式工作，通勤上班会过时，但每次做出此类预测时，个人计算能力都增强了一点，网络连接和通信可用的带宽也增强了。随着支持远程会议的技术不断改进，随着通过诸如博客、社交网站和多人在线游戏等信息通信技术平台进行交流成为常态，虚拟工作场所的兴起也会可能成为现实。然而，这些可能性能否实现取决于一系列因素，我将在稍后讨论。

娱乐业中的工程学

工程学对人们工作和生活的影响很复杂，对许多人来说，工程领域单调且危险的工作条件掩盖了整体的改善，但工程学对人们的社会生活的贡献又是相当积极的。像MP3播放器这样的技术显然是工程产品，但早在MP3诞生之前，工程学就以多种方式渗透在人们的休闲活动中了，并且已经持续了几十年，甚至几个世纪。文艺复兴时期的工匠，包括达·芬奇，运用他们的机械技能，制造了精巧的自动装置，这些装置在公共庆祝活动中得以尽情展示，令众人惊叹。公共和私人休闲活动现在越来越受到日益先进的工程发明的强烈影响。

音乐可以是一种纯粹而简单的乐趣，与鸟鸣一样古老，但音乐创作和人们对音乐的体验越来越多地受到技术的影响。如果你演奏一种原声乐器，你的音乐乐趣大部分来自数小时的独自演奏或在管弦乐队中的演奏，那么对你而言，音乐可能是远离技术主导的世界的“避难所”。但对于大多数音乐爱好者来说，音乐的体验可以直接或间接地通过工程产品实现。

音乐的录制和回放显然是一项工程创新。爱迪生发明了一种叫作“留声机”的装置，它能在蜡筒上录音，并能进行不稳定的回放。他的一些实验录音仍然留存至今，如他唱的《玛丽有只小羊羔》，但它们可能无法令人信服地证明工程学是音乐乐趣的源泉。不过，蜡盘和播放蜡盘的留声机是许多代音乐新媒体的原型，如黑胶唱片和留声机，还有磁带、CD和MP3播放器的闪存驱动器。这些新开发的音乐形式提高了音质，实现了高仿真播放，增强了音乐存储容量，并且可以更容易获取和共享录音（尽管一些爱好者会争辩说最近开发出的更大容量是以黑胶唱片提供的

声音的真实性和高质量为代价的）。

音乐录制和回放的格式在向观众传送音乐时至关重要，但音乐制作本身就是一项技术含量越来越高的事业。自20世纪50年代以来，主流音乐中的乐器逐步电气化，工程学为寻找更好、更前卫的声音提供了基础。早期电子音乐的发展得益于电视和电影作曲家的帮助，他们试图创造出超凡脱俗的声音，为越来越奇幻的外太空电影影像伴奏。随着社会被太空的概念所支配，电子乐需要在视觉和音乐上表现出星际未来的样子和声音。路易斯·巴伦（Louis Barron）和比比·巴伦（Bebe Barron）堪称先驱，他们在1956年为电影《禁忌星球》（*Forbidden Planet*）创作了第一部完全电子化的电影配乐。1958年，英国广播公司开创性的BBC广播声效工作室由此诞生。

随着声音合成器的发展，电子音乐的实验在20世纪六七十年代得到了进一步推进。合成器的名称可能暗示，其意图是模仿自然声音，并通过电子手段再现这些声音，但合成器的真正影响在于带来完全脱离这个世界的音乐声音。合成器的声音对迷幻的一代来说就像糖果一样，合成器对任何想要创造“超乎寻常”的声音的乐队都是必不可少的。一些艺术家对合成器的音域极富兴趣，他们开始创造自己的机器。“印第安人不断扩大的头带”（Tonto's expanding headband）是鲍勃·马古洛夫（Bob Margouleff）和马尔科姆·塞西尔（Malcolm Cecil）的绰号，“Tonto”指的是由当时各种合成器模块组成的一款巨型机器。作为音响工程师，他们在制作史蒂维·旺德（Stevie Wonder）的专辑时使用了这种机器。还有一位探索合成器世界的音乐家是爵士乐键盘手赫比·汉考克（Herbie Hancock），他对合成器产生浓厚的兴趣，可能是因为他在大学里学习电气工程。在20世纪七八十年代，像发电站乐队（Kraftwerk）这样的乐队一直在探索用电子手段创作音乐，对他们来说，制造设备和创作音乐之间的界限很模糊。

现代音乐创作和制作在很大程度上归功于软件开发和电子技术的发展，如现有的采样和排序软件，有助于业余音乐人制作原创音乐。随着信息技术的发展，许多事物大众化了，音乐也大众化了，录音歌手们能够自己制作音乐，并上传到网上，与全世界的听众分享。

罗伯特·穆格——名字印在T恤上的工程师

起初，罗伯特·穆格（Robert Moog，1934—2005）喜欢摆弄他父亲（一名工程师）存放在地下工作室的无线电设备，后来他对制

作泰勒明电子琴产生了兴趣。泰勒明电子琴是路易斯·泰勒明（Louis Theremin）发明的一种电子乐器，在科幻电影的音乐创作中非常流行。穆格的第一次创业是为自组装的泰勒明电子琴制作配套元件。从此，他对制作电子音乐的新方法产生了兴趣。

激励穆格开发声音合成器的挑战在于创造具有不同音高的电子声音。合成器中的声音由振荡器产生，穆格通过控制输入振荡器的电压，使振荡器产生的声音在其音域范围内变化。他的合成器还有一个关键特征是具有“包络发生器”，它可以发出可控的声音，这样按下一个按钮或按键就能发出一个音符。

穆格合成器由一系列独立的模块组合而成，这些模块包括压控振荡器、包络发生器、滤波器和放大器，它们可以以不同的方式连接在一起，产生不同的声音。模块间灵活的连接是通过“连接线”实现的，模块之间的不同“连接”会产生不同的声音，因此穆格合成器中的模块由演奏的音乐家手动连接或重组，这意味着音乐制作本身就是一项工程任务。很多时候，制作穆格合成器的工程师还得教音乐家如何演奏，甚至为他们演奏合成器。

穆格合成器很受艺术家的欢迎，如史蒂维·旺德、Emerson，Lake & Palmer乐队等都喜欢用穆格合成器，但真正使穆格合成器进入公众视线的是由温蒂·卡洛斯（Wendy Carlos）演奏录制的一组巴赫的名曲，专辑名为《时髦的巴赫》（*Switched-On Bach*）。看来公众的认可取决于能否证明穆格合成器能演奏“真正的”音乐。

罗伯特·穆格成功地将工程师想要修理的愿望与音乐家想要创造新颖音乐的愿望结合起来。穆格合成器的声音已成为一种标志，合成器背面熟悉的穆格标识如今也经常出现在T恤上，对于工程师来说，这当然是种难得的荣誉。[2]

表演艺术的发展也有类似的经历，表演艺术从舞台剧发展到了电影和电视剧。从磁带到录像到DVD，再到现在的高清DVD；从投影到阴极射线管，再到平板高清电视，由于工程上的突破，人们体验事件的方式发生了变化。从剧院的音响、灯光和舞台系统，到让人们可以在家中观看电影和戏剧的相对廉价的格式和平台，工程学发挥着重要作用，它使更多的观众获得娱乐享受。

当然，从电视机的发明到数字广播的普及，这些工程工作更直接地专注于为大众带来娱乐。广播已成为人们必需的基础设施的一部分，人

们依靠电视和广播获取新闻和信息，尤其是在危急时刻或历史性庆祝时期。如人类首次登月、“9·11”事件等人类历史上一些重大的事件使全世界人民的注意力集中到一起，在自己家里或办公室收听或观看这些事件的发展。移动通信在信息共享方面也可以发挥重要作用。有人认为，移动电话在非洲的普及使腐败问题很难不被报道，因为选民能够迅速将选举结果传达给广播电台，这样当局就难以误报选举结果。随着移动多媒体的发展，手持设备让人们很容易接触互联网和数字广播，无论我们身在何处，都永远不会与信息和娱乐基础设施“断开连接”。

这些例子表明，电子、信息和通信技术对人们的休闲活动是多么重要，但更多的公共娱乐活动依赖于其他工程领域。结构工程师为人们带来举办体育赛事和演唱会的体育场馆。例如，伦敦的千年穹顶（Millennium Dome）是为纪念21世纪的到来而建造的。它的屋顶非常轻，像帐篷一样，覆盖在圆顶形的钢索网上，被誉为一项伟大的工程成就。可惜的是，在那里所举办的千禧年展览并不那么有趣，而这个昂贵的项目有可能成为一个令人难堪的政治事件。然而，曾对圆顶屋顶进行过创新的标赫工程设计顾问公司（BuroHappold Engineering）再次被选中，帮助把这个建筑改造成了一个音乐会场所。千年穹顶以O_2体育场的新面貌面世，成为世界上最成功的音乐场馆之一，2008年其现场演出门票销售额超过了麦迪逊广场花园。

千年穹顶的设计和建造中的各种结构创新，往往是艺术界创造开创性的公共艺术所必需的。来到英格兰北部的游客都会看到一座巨大的雕塑——北方天使，那是一个人形雕塑，伸展的双臂由飞机双翼代替。安东尼·葛姆雷（Antony Gormley）设计的这座雕塑高20米，翼展53米，需要结构工程师的技术为其奠定坚实的基础，并确保艺术家的设想在这个尺寸上能够实现。当然，在这个尺寸下，竖立这个雕塑是一个重要的建设项目，奥雅纳公司成功地应对了这项挑战，还将其他超凡的艺术设想变为现实，其中包括一座名为玛耳绪阿斯（Marsyas）的雕塑，宽150米，用血红色的拉伸PVC薄膜制成，是由安尼施·卡普尔（Anish Kapoor）为伦敦泰特现代美术馆创作的（见图4-1）。

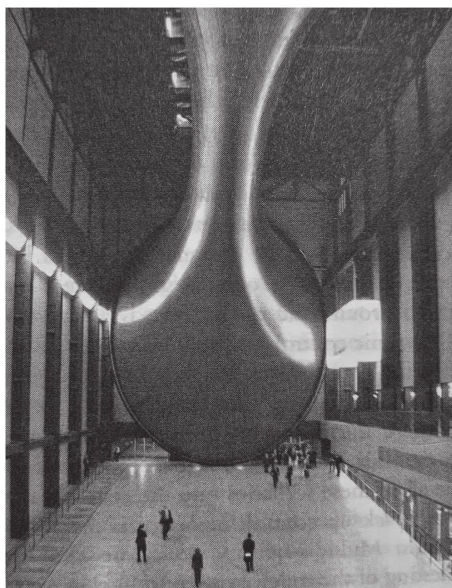


图4-1 玛耳绪阿斯

安尼施·卡普尔的雕塑——玛耳绪阿斯，2002年于伦敦泰特现代美术馆展出，是由奥雅纳公司的工程师协助建造的。

资料来源：奥雅纳公司

工程学专业知识对于具有更直接的内部影响的结构也是必不可少的。过山车的设计运用了一系列工程学的技术，设计师先建立轨道的几何结构，也就是乘坐路线，然后对该路线进行动态分析。过山车既没有动力系统也没有转向装置，在滑行开始时，电动马达把过山车升高到“提升坡”的顶部，之后仅在重力的作用下就会开始一段令人反胃的旅程。设计师通过动态分析计算出过山车沿着路线行驶的速度和加速度，这就确定了在不失去动力的情况下，过山车轨道的长度和形状是否合适。结构工程师设计轨道及其支承结构，确保它能够承受各种因素造成的力和行驶在轨道上的过山车施加的力；机械工程师负责设计过山车，设计它的疲劳荷载，使它在没有悬架保护的情况下能够承受在硬轮上高速运行带来的应力。设计出的过山车不会跳出或偏离轨道，并且必须把乘客控制在车厢内，这样他们就不会在重力作用下弹射出去。当从青少年到健美运动员在乘坐过山车时，如何设计过山车的控制装置，把每位乘客都舒适地安置在适当的位置，这是一项挑战。

过山车的设计既要惊险刺激，也要保证安全。如果轨道上的过山车不止一辆，让一辆车在乘客上车时，另一辆车在轨道上行驶，那么总会有发生碰撞的可能。电子控制系统监控过山车的行程，并连接到安全系

统，一旦发生异常，安全系统就会介入。设计这些系统是一个复杂的问题，设计者必须事先考虑发生故障的所有可能的方式，以便工程师能够把所有这些情景编入系统中，包括在控制系统本身失灵的情况下加入备用控制系统。一旦过山车就位，多学科团队还将对过山车进行全面测试，模拟所有可能的故障模式，以确保其安全运行。过山车的设计就是保持肾上腺素快速上升，同时最大限度地降低乘客的风险，确保既刺激又有趣。

本书一直强调工程学就是使用专业的、有原则的方法来开发，满足人类需求和愿望的系统。但在娱乐领域，情况就大不相同了。工程学带来了人们不曾知道自己想要或需要的东西，带来了人们可能无法想象，但现在却离不开的东西。因此，工程学给人们的生活带来了新视角。但有些人可能会说，它也带来了负面影响，比如对技术的沉迷，有些人在互联网上花费了太多时间，或对昂贵的新颖玩意儿变得贪得无厌。即使在娱乐领域，工程学对社会的影响也是一把双刃剑。

社会如何塑造工程学

> 每一项工程成就都是由其所处的文化、政治和时代塑造的工程成就反过来也塑造了这些文化、政治和时代。[3]

以上讨论可能会使人们认为，工程产品对人们的生活至关重要，因此，技术是塑造社会及其发展的最基本力量之一。但是，这并不意味着在科技进步之路上，所有的人都是被动的搭便车者。这种被称为“技术决定论”的观点有些简单化，其实，人与技术之间的关系远比这复杂得多。

工程和技术既受到社会的影响，同时也是社会塑造的。人们总是得选择研究的方向，以及为市场开发哪些技术。还有一些影响不是由意识决定的，这些影响在一定程度上决定哪些技术会蓬勃发展。这些非技术性影响在确定工程师的工作重点以及哪些技术应成为人们生活核心的方面发挥着重要作用。一旦开发了技术，如何利用技术提供的可能性在很大程度上依赖于多数人的偏好、技术在成本和地理分布方面的可获得性，甚至依赖于政府对技术等要素的控制等。例如，尽管早些时候已有人证明，在知识经济时代工作的人，在技术上能实现远程工作，但在这方面并没有大的发展趋势。多数人仍然倾向于在工业区工作，与同事共事，因此这些技术的可能性也许仍然处于休眠状态。

有时，在相互竞争的技术平台之间需要一个直接的选择，而工程学上的“最佳”并不总是赢家。近几十年来，视频录制格式之间发生了许多冲突。在开发录像机时，工程师们可以在Betamax（索尼公司开发的磁带格式）和VHS（日本胜利公司开发的家用录像系统）之间进行选择。视频格式之间的竞争只能通过大众的认可来解决，Betamax因为价格昂贵，最终输给了VHS。当HD DVD和蓝光光碟争夺作为高清DVD格式的霸主地位时，也出现了类似的僵持局面。蓝光之所以战胜了HD DVD，是因为市场覆盖面广（部分原因是蓝光播放器内置于索尼游戏机中），以及电影发行公司仅支持其中一种格式。

这些例子表明，消费者的偏好（往往基于成本和便利性）对于采用哪种技术很重要。还表明，技术平台的普及与其支持的媒体的可用性之间存在着共生关系。因此，不同类型的视频或DVD播放器的普及在很大程度上取决于是否有合适格式的电影。当然，电影发行商决定使用哪种格式，商店决定储存哪种格式，在很大程度上取决于不同播放器的受欢迎程度。最初，两个选项可以共存，但随着一个技术平台更受欢迎，或者一种媒体更广泛地被运用，平衡将会向这个方向倾斜，因此是与技术质量不一定相关的因素决定哪个胜出。

工程技术能否取得成功，取决于是否被大量用户所接受。通信系统就是一个典型的例子：电话、传真和电子邮件系统只有在有足够多的人使用，它们由此变得有用时，才能建立起来。如果人们不知道他们可以打电话给谁，谁还想拥有一部电话呢？

技术的成功往往依赖于基础设施，只有当足够多的用户感兴趣时，基础设施才会得以开发。例如，使用氢燃料电池的汽车排放量低，并且是潜在的低碳交通方式（取决于氢的产生方式），但这种汽车的普及取决于是否有足够的氢燃料站供司机加油，而加油站只有在有足够多的司机使用时才会提供这项服务。因此，人们面临着一个封闭的循环，这个循环极有可能只能通过一些非工程的考虑来打破：找一个非常好的理由，使氢燃料电池汽车对买家有吸引力，从而产生对加油站的明显需求；或者某个公共机构或大公司做出重大承诺，要建立基础设施，让购买汽车物有所值。

这些例子不仅展示了在技术之间做出明确选择的情况，而且还突出了市场力量在决定哪些技术占据主导地位方面的作用。工程学是要解决问题和满足需求的，在以娱乐为目的的工程学中，它应该创造欲望和满足欲望，但这同时表明，没有一种技术形式在本质上是重要或影响深远

的。工程师的工作是否会产生一些有价值的、能成为人们日常生活一部分的东西，或者仅仅产生被认为是技术上的宝物，但在生活中却是可有可无的东西，这都取决于是否有该技术的消费者。无论消费者是广大的公众，还是如医疗服务队或一级方程式赛车队等专业客户，如果工程产品没有市场，它们就会逐渐消亡。工程学是为了满足人类的需求，除非存在对技术的需求，或者可以创造出对技术的需求，否则工程学不会有真正的未来。

政治决策对于工程研究或开发进展至关重要。以发展核电或建设一座新的核电站为例，这不是一个工程研究团队或公司可以单方面决定的事情。由于多种原因，这个决定必须由政府来做。

首先，如核能等一些工程研究或运营领域会给公众带来风险。前文已讨论过，尽管如何管理这些风险在很大程度上是一个工程问题，但是判断何种程度的风险是可以容忍的，以及感知利益是否大于风险，这些问题超出了工程师的技术考虑范围，引起了公众及其当选代表的关注。在核能方面，还需要考虑设立核电站或处理核废料的确切地点，在做出这些决定时，还必须考虑到地方和国家的公共利益。

其次，许多工程项目对整个国家及其基础设施都有影响，必须就如何实施这些项目做出一些集中决策。开发新一代核电站是政府有关问题考虑的问题，因为这是决定一个国家能源供应安全的问题。是否开发或何时开发新一代核电站须视多种因素而定，例如发电网络其余部分的容量、是否会兴建更多的燃煤电站，或是否会在更大程度上使用可再生能源。当工程决策影响到整个国家时，政治和技术方面的考虑是最重要的。事实上，关于能源供应的许多决策依赖于有关碳排放的国际政治协议，因此有关这些问题的决策与世界政治密切相关。

政府通过立法和政府采购技术的政策、法规来影响技术。在某些技术领域，人们认为，研究工作需要公众同意才能进行，而这种同意是以允许研究或排除研究可能性的立法形式体现的。医学研究特别需要受立法的制约，如干细胞研究或治疗性克隆研究，不同国家的态度不同，因而产生了不同的立法决策。在这些领域，要对风险与利益加以权衡，科学证据则根据公众的感受进行评估。

工程学往往较少引起争议，但由于工程行业的某些领域会对广大公众产生影响，因此需要进行严格的监管。美国环境保护局和英国健康与安全执行局等机构有特殊的影响，并能对工程实践加以控制，例如化学工程等领域将特别受到监管机构的严格控制，这些监管机构控制有害物

质的使用和处置。工程专业本身也在监管中发挥作用，美国电气和电子工程师协会等机构制定新技术标准，以确保标准的可靠性和互通性。

在某些领域的工程研究和实践中，可能会出现争议，而解决争议的最佳方式是政治家、公众和工程界之间进行对话。许多国家目睹了公众对开发转基因作物的反应，同样，前文中所述的纳米技术的开发也可能引起了类似的公众抗议。纳米材料具有长期污染效应和健康风险，这表明，纳米材料是一个可能引起公众关注的领域。在这一领域和类似的新兴技术领域，政治家、工程师和公众之间的讨论至关重要，合成生物学就是这样一个领域。合成生物学，顾名思义，就是用人工方法制造生物组件的学科，这涉及使用工程方法从其基本模块构建生物材料，这样有可能设计出比自然界提供的更好的生物组件。该领域很容易引起公众的极大关注，因为工程师可能正在合成和操控生物体。关于开发和使用此类工程应用的决定不能仅仅基于技术考虑，更广泛的公众接受度也至关重要，并且还必须对这项技术的所有方面进行辩论和公开讨论。

工程学中的伦理责任

工程学对社会产生了深远的影响。同样，社会也影响着工程学。工程学与其所影响的人之间的关系，是否会引起需要工程师处理的道德或伦理问题呢？伦理问题在医学界备受瞩目，但这可能是因为医护人员面临着许多这样的情形，人类生命危急，他们需要对正确的行动方案做出判断。工程师有类似的责任吗？

工程学似乎不会引发医学伦理争论的那种生死问题。然而，工程学往往也涉及生死攸关的问题，而且一些最伟大的工程成就已经让人们付出了巨大的生命代价。比如布鲁克林大桥，导致许多建造者因减压病而死亡或身患重疾。桥的塔身是通过将沉箱沉入河床而建造的，沉箱箱体中空，水从空心箱体中抽出，这样工人们就可以在沉箱内挖掘，在河床上建造地基。工人通过竖井从水上进出沉箱，但河床很深，竖井快速到达地面，他们受到了压力快速变化的影响，承受了可怕的身体疼痛和剧烈呕吐——这就是“减压病”。由于当时未能查明原因，工人继续在沉箱工作，并在轮班结束后迅速离开，继续患病。就连该项目的总工程师华盛顿·罗布林（Washington Roebling），也被这种疾病击垮，造成了终身残疾。他是构思了这座桥梁计划的约翰·罗布林（John Roebling）的儿子。

其他著名的工程师也因工作而备受痛苦。伊桑巴德·金德姆·布鲁内尔在为父亲的伟大工程——泰晤士河隧道工作时差点丧命。泰晤士河隧道是第一条在通航河流下为步行旅客建造的隧道，隧道是由工人挖掘河流下的土地建造的。水频繁地冲进部分建成的隧道，有一次，布鲁内尔因在隧道中工作差点溺水而亡。但他并不是所参与的项目的唯一受害者。在他的铁路项目中，有一条“盒子隧道”在施工过程中夺走了100多人的生命。在建造那艘巨轮“大东方号”的过程中，有一些特别恐怖的故事，其中有一位工人和他的年轻助手被困在了他们铆接在一起的船体的两层之间。布鲁内尔本人也被认为可能是工程工作的殉道者，因为他在53岁时因长期艰苦工作而疲惫不堪，过早地死于中风。

不过，在这些大型工程项目的建设中，死亡的主要是一些工资较低的半熟练工人。我们应该评判领导这些项目的工程师吗？还是接受“社会进步必然会造成一定的伤亡”？当然，以如今的标准来看，建造布鲁内尔的“盒子隧道”所造成的死亡率是无法容忍的。工程项目工作人员的健康和安全责任应由指导该项目的工程师承担。日本明石海峡大桥，是世界上跨度最长的悬索桥，建造时没有造成人员伤亡。明石海峡大桥不仅比布鲁克林大桥的跨度长，而且在工程上也有所提升。这也反映了世人态度上的转变，人们不再容忍工业事故造成的死亡，并做了大量努力来预防这些事故。

工程师可能会被认为应对工程系统建造过程中所造成的事故和伤亡负责，但是工程系统的使用呢？工程师是否要对所开发的技术的潜在用途负责？工程师除了要对人的生命负责外，还要对其他事情负责吗？工程师是否有责任考虑他们的工作对自然和环境的影响呢？工程实践会涉及许多伦理问题，在这里，我们将讨论其中两个会让工程师进退两难的领域。

引起争议的一个工程实践领域毫无疑问是国防工程。在国防工程中，许多工程师会和军方合作，或在军队里工作，或者从事军方资助的项目。工程师可能不会活跃在战场上，也可能不会运用他们开发的武器，但是与战争正义性相关的那些道德问题也适用于国防工程吗？虽然这里解决不了这个棘手的问题，但这里将探讨与国防工程有关的一些思考。

我们很难将为国防利益而从事的工程与纯粹的民用工程分割开来。例如，许多通信技术的突破就是军事领域工程的结果。因此，反对军事工程并不仅仅是反对研发核导弹，而是反对一系列与人们日常生活的核

心技术不可分割的广泛的研究。当然，如果没有军方支持的研究，工程师们也可能开发出现在所使用的通信技术，但是，由于军事利益，这项技术无疑取得了迅速的进展。

许多在军事领域工作的工程师可能会觉得他们所做的工作有助于促进和平，或者至少有助于减少冲突。军队装备精良可能会起到威慑入侵的作用，从而防止战争。同样，在军队工作的工程师可以设计武器，这样他们就可以做他们应该做的事情。比如说，他们可以破坏一个国家或社区的基础设施，从而使这个国家或社区陷入瘫痪，而不是残害生命，特别是无辜平民的生命。工程师可以不开发像集束炸弹这样的武器，这种武器的设计目的是留下由小型炸弹形成的尾流，这些小型炸弹会像地雷一样散落在某个区域，可能会在未来的某个时候给这片土地上的无辜民众带来意外或死亡。如果工程师们能够设计出高效的系统，并且达到预期目的的话，那么他们就一定能帮助制造出更好的武器，大大减少“附带损害”吗？

然而，如果电力和清洁水供应受到影响，破坏一个国家的基础设施也会给无辜者带来巨大的痛苦，而且死亡并不是唯一的惩罚。我们很快就会看到，把他人的福祉放在首位是工程师所公认的道德责任，而通过战争杀人，或者通过破坏基础设施来降低生活质量，似乎与这一原则背道而驰。如果工程师所从事的工作最终可能会使无辜的生命丧生，那么他该怎么办呢？他们可能会争辩说，如果他们能把工作做得尽可能好，战争就能尽可能地短暂、迅速，死亡人数就会更少。工程师可能会设法避免从事这样的项目，而专注于他们所做的工作在民用方面的应用，或者甚至把职业生涯奉献给那些帮助受战争影响的人的项目中，比如在饱受战争蹂躏的地区重建受损的基础设施。

工程学的有趣之处在于，这些问题往往由个人来处理。作为一个整体，工程行业很少在参战或制造用于战争的武器的合理性上表明立场，这与医学有所不同。在医学领域，对于如堕胎或安乐死等影响医生职业的重大伦理问题的可接受性，他们往往有自己的发言权和立场。工程学应该站在生死问题的立场上呢，还是纯粹出于个人良知呢？

工程实践并不担心制造紧张。工程师虽接受他们应以他人的福利为重，但他们还是制造武器，同样，虽然工程师广泛接受他们对环境负有的重要责任，但许多工程师还是在他们的工作中开发了会造成污染的技术，我们知道污染的影响非常持久，甚至可能威胁到地球未来的宜居性。

有确凿的证据表明，由于人类活动，大气中二氧化碳的增加会导致气温显著升高，这反过来又会导致海平面上升，造成气候模式的变化，使地球上目前有人居住的地区无法居住。我们知道，二氧化碳的增加是由于燃烧化石燃料来发电以及为机动车、飞机提供动力而造成的，但工程师仍在设计和生产这类车辆，并建造和维护燃煤和燃气发电站。工程师们继续开发这些造成污染的技术在某种程度上是道德缺失吗？

在确定工程师对设计和生产这类技术应负的责任范围时，有几个相关方面需要考虑。工程师可能会做出的简单反应是，他们设计飞机或汽车，只是因为市场有需求。如果有人有过错，那就是经常乘飞机的顾客，或者是航空公司为了盈利而鼓励这种行为。因此，工程师只是在满足他人的欲望，他们不能对他人的欲望负责。

当然，这一立场过于简单化。本章开篇的讨论已表明，社会和工程学之间的关系很复杂。社会产生了对工程师所创造的东西的欲望，同样，工程师创造社会想要或认可的东西。因此，通过制造强大的耗油汽车，工程师不仅满足了预先存在的需求，而且还在刺激这种需求。然而，工程师可能会说，拥有和使用汽车不仅仅是社会的愿望，汽车已经成为生活中的必需品。人们的生活和工作方式，以及许多城镇的设计，使拥有一辆汽车对人们变得至关重要，因此，设计和开发汽车的机械工程师正在满足这种重要的需求。工程师可能也会说，问题出在汽车的使用上，如果有太多人只开车一千米去上班，而不是把车留到更长的行程上使用，这不是工程师的错，而是车主的错。但这更像是工程师在争辩说，他们设计武器只是为了威慑，如果武器实际上用于战争，无论如何都不能认为他们应承担责任。

公平地说，在汽车、飞机和其他交通工具的设计和开发方面，工程师们重点关注的是提高能源效率，或者开发使用环境可持续、污染较少的燃料（例如生物燃料和氢燃料电池）的车辆。但那些选择将自己的职业生涯奉献于设计高耗油赛车的工程师呢？这些赛车并不能满足家用汽车的任何需求。

这些实际上是相当普遍的问题，涉及工程师在何种程度上对其开发的技术的后期影响负责，以及工程师是否有义务不从事可能造成危害的工作。但是，伦理问题涉及工程对环境的直接影响。如前所述，土木工程尤其对自然环境有重大影响，许多土木工程项目需要详细评估所做的工作对周围环境和栖息物种的影响。工程师如何权衡他们所从事工作的益处和可能对环境造成的危害？通常，这可以归结为权衡正在建造的建

筑（无论是住宅建筑群还是水库）的好处与对环境的负面影响（比如某一特定物种可能丧失栖息地），但是权衡成本和效益并不容易。人们如何比较让贫穷家庭在舒适环境中拥有一座房屋与保留一块稀有物种交配地的价值呢？这些都是截然不同的事，很难用一种共同的尺度来衡量。如果我们判定自然景观具有某种内在价值，那么我们是否会认为，与其为了人类的利益而对自然景观进行改造，还不如让其保持自然状态？[4]

这种有争议的项目带来了一种救济问题，这个问题在工程其他领域出现的概率很小。我们该如何平衡本地民众的利益与广泛的社会的利益？又该如何平衡广泛的社会的利益与自然环境的利益？工程会产生与不同环境的价值有关的难题，例如，在英国发电计划中，经常需要考虑的一个因素是鸟类会因飞入叶片而死亡。如果建造风力涡轮机确实给鸟类带来了威胁，我们该如何权衡土著物种的利益与为解决全球气候变化问题做出一些微小贡献带来的价值呢？

环境伦理学取得了长足的发展，不过我还没有真正接触到这个领域所讨论的诸多理论和立场。但这一节提出了一些环境责任方面的问题，工程师在考虑他们所从事的项目造成的影响和他们所选择的事业时，需要探讨这些问题。

遵守规范：工程师的道德准则

以上考虑说明了工程师在决定专攻领域和如何实践时所面临的进退两难的道德困境，但是，工程研究和实践的所有领域都会涉及某种道德义务，或者会产生进退两难的道德困境。事实上，就像医疗专业人员一样，如果由工程师来处理生死攸关的情况，有可能要做出一些决策，来权衡公众的健康和安全，或客户的利益与紧迫的完工期限、对雇主的忠诚与不断上涨的成本。当意见相左的两派势均力敌时，这些决策就成为进退两难的道德困境，选择任何一项都可能带来某种程度的道德责任。在这种情况下工程师该怎么做？他们必须依靠自己的个人标准吗？

本书第1章论述了专业协会的出现是工程学发展的一个关键阶段。工程学被认为是一种行业，这一事实在考虑工程师个人道德责任的范围时具有重要意义。行业人士的特点是有义务成为某一工作领域的专家（无论这个领域是医学、法律还是会计），同时也有义务维护行业道德原则。行业人士联合起来不仅在于他们的行业知识，还在于他们有义务维护行业在公众心目中的声誉。一个行业的声誉建立在与其他行业和更

广泛的社会成员进行公开、诚实、公平和合乎道德的交往的基础上。

许多行业有道德规范，规定了行业人员在行业活动中必须遵守的规则。最著名的道德规范是《希波克拉底誓言》（*Hippocratic Oath*），它通过医生的职责把当代的医生和过去的医生联系在一起。医生的职责是照顾病人，任何时候都要避免给人们造成伤害，而且，这个誓言可能由不同国家的专业医疗机构加以发展或丰富，以使其更好地适应现代和地方的文化或政治背景。医生的行为受其注册的专业团体的规则所制约，但医生的核心职责并没有改变。

工程师的职责是否可以用所有工程师都需遵守的一份誓言或规范来规定？根据迈克尔·戴维斯（Michael Davis）在《像工程师那样思考》（*Thinking Like an Engineer*）一书中的说法，美国电气工程师协会（American Institute of Electric Engineer）于1912年通过了第一套工程师道德准则，在随后的10年里，美国其他工程协会也纷纷效仿。世界各地的主要工程机构经常向其成员宣传道德行为准则，许多机构可能会对违反行为准则的成员予以处分或将其开除。

我们有必要比较不同机构的两套行为准则，以了解为其成员设定的道德原则之间的异同。英国土木工程师协会现行的行为准则有以下6条规则：[5]

1．所有成员应忠实地履行其专业职责。

2．所有成员只应从事其有能力从事的工作。

3．所有成员均须充分顾及公众利益，特别是有关健康和安全方面的事宜，以及关乎子孙后代福祉的事宜。

4．所有成员应适当考虑环境和自然资源的可持续管理。

5．所有成员应注重其专业知识、技能和能力的持续发展，并应为其他成员的继续教育、培训和职业的持续发展提供一切合理的帮助。

6．所有成员应当：

a．如果被判定犯有刑事罪行，通知本协会。

b．破产或丧失公司董事资格时，通知本协会。

c．如其他会员严重违反《专业行为准则》，通知本协会。

这些并不都是纯粹的道德问题，例如，可能并不是所有人都认为破产是道德或伦理缺失，但大多数规则与道德有关。美国电气和电子工程师协会有以下10条道德准则：

> 作为美国电气和电子工程师协会的成员，我们承认技术极其重要，它影响整个世界的生活质量；也意识到我们每个人对自己的职业、我们的成员和我们所服务的群体方面负有责任。在此，我们承诺遵守最高的道德和职业行为，并一致同意：
>
> 1．敢于承担责任，做出符合公众安全、健康和福利的决定，并及时揭露可能危及公众或环境的因素。
>
> 2．尽可能避免实际的或察觉到的利益冲突，并在确实存在利益冲突时向受影响的各方披露。
>
> 3．根据现有数据提出索赔或预估时，保证诚实和实事求是。
>
> 4．拒绝一切形式的贿赂。
>
> 5．提高对技术及其适当应用和潜在后果的了解。
>
> 6．保持和提高技术能力，只有在有足够的培训经验或工作经历，或在充分了解有关限制条件之后，才能为他人承担技术任务。
>
> 7．寻求、接受，并提出对技术工作中肯的批评，承认和改正错误，适当赞扬他人的贡献。
>
> 8．公平对待所有人，不分种族、宗教、性别、残疾、年龄或国籍等因素。
>
> 9．避免以虚假或恶意的行为伤害他人及他人的财产、名誉或工作。
>
> 10．协助同行和同事的职业发展，并支持他们遵守本道德准则。

这两套准则在语气和细节上有很大差异，但两者都提出了一套行为标准，而且大多数人认为，这些行为标准是关于道德的常识性问题。这两套准则都有专门针对职业道德的要求，也就是说，它们都涉及工程师的责任，工程师有责任更新他们的专业知识，并且只在这些知识范围内工作。如果工程师承担了他们不能胜任的工作，这会对工程行业造成损害，对公众造成不良影响，从而可能给他们所设计或建造的系统的用户带来风险。这两套准则还强调诚实和正直在职业交往中的重要性，包括

拒绝任何形式的贿赂（在英国土木工程师协会准则的补充说明中有所涉及）。然而这两套准则的有趣之处在于它们的不同之处以及它们没有提及的内容。

有时，为了给所有的工程师制定一套道德准则，人们付出了巨大的努力。英国皇家工程学院制定了一份适用于所有工程师的道德准则声明，这份声明得到了工程界的广泛认可，然而，这份声明通常与各个机构的行为准则一起使用。的确，很难为所有的工程师制定一套明确的道德准则，因为道德准则的细节内容极易出问题。工程规范规定，工程师必须优先考虑公众的健康和安全，但关于工程师是否必须尽一切可能保证公众安全，或者是否应该采取一切合理可行的措施来确保安全，各套准则的具体措辞可能有所不同，内涵也有所差别。根据道德准则，工程师有义务保护环境。但我们在前面已看到，人们对工程的某些领域存在争议，这些领域被认为是道德的还是不道德的，取决于人们如何理解对环境的责任。准则可以有不同的解读，但如何理解英国土木工程师协会准则中的“适当考虑”环境呢？这意味着应与诸如人类福祉等其他问题一起考虑，但并没有规定哪个应该重点考虑。

这些并不是批评这两套准则，但这些问题是道德准则中几乎不可避免的特征，职业道德的规范化充满了争议，在新的形势下，应为理性的重新解读留出空间。

此外，创建一套适用于所有工程师的规范，也面临着重大的挑战。工程行业现在是一个全球性的行业，大型的工程公司在世界各地开展项目，并向多国的公司和政府提供产品和服务。但不同的国家有不同的文化，文化和道德紧密地交织在一起，虽然各国对许多行为方式的看法一致，但在一些有争议的道德领域，不同的文化还是有不同的看法。

工程师在从事不同于他们通常工作的项目以及在不同于最初接受培训的国家工作时，他们可能会发现，他们认可的行为标准受到了挑战，或者他们认为正常或可接受的做法可能会被视为是不适当的或者该受指责的。如有些国家对付款来换取合同持不同的态度，而在工程师自己的祖国，支付这类款项被视为贿赂，那么他该怎么办呢？在这种情况下，答案肯定是非常明确的：因为行贿行为可能对更广泛的公众造成伤害（因为支付最高价格的公司得到了合同，而不是最有资格的那一家），所以工程师有责任努力在其他国家杜绝这种做法。然而，其他文化差异可能并不是那么明显，在某些文化中，工程师可能更看重对公司所负的责任，而不是自己的职业职责，他们也不打算对公司内违反职业规范的

做法表明立场，这种立场可能是基于一种特定的道德价值，即忠诚，而且，有些人可能会认为，在紧要关头，忠诚和职业准则一样重要。

问题的关键在于，道德问题永远不能简化为一套明确涵盖所有情况的规则，即使工程师们可以确定能够指导所有工程师的一些道德准则，而且这些道德准则在大多数行为准则中也都有体现。道德准则的基础是诚信，关心公众和环境，以及以最高标准履行技术职责等，但这些准则并不能告诉工程师面临什么情况时该怎么做。进退两难的道德困境很难解决，所以几个世纪以来哲学家一直在努力解决这些困境，但是，在工程行业中不可避免地会遇到进退两难的道德困境。工程师必须掌握重要的技术知识和技能，他们也必须认识到他们所从事的工作对社会的广泛影响，他们必须能够在艰难的情况下判断什么是正确的行为方式，并对所面临情况中的道德方面的问题保持高度的敏感。因此，在工科课程中引入伦理学教学，对工程师解决这些困境有很大的帮助。工程师在社会中扮演着核心的角色，这就带来了一种责任，通常也是一种期望，那就是他们应做正确的事情。工程师也需要具备某些技能，来指导他们做出正确的决定。

章后总结

- 工程学建设基础设施，对人们的生活质量有重大影响。工程学的发展不仅改变了城市版图，还影响了人们的生活方式和工作方式。
- 工程学对人们的休闲娱乐也影响深远，在录音和录像装置、电子乐器、传媒、演出场馆、游乐设施等方面，工程学均发挥了重要的作用。在娱乐行业，工程学不止满足人们的需求，还创造出新的需求。
- 工程学塑造社会，社会也同样塑造工程学。许多形式的工程技术能否取得成功，取决于是否被大量用户所接受。除市场力量外，政治决策对工程研究或开发进展也至关重要。
- 工程师会面临诸多道德争议问题，比如一些项目曾造成人员伤亡，工程活动还可能对环境造成污染、改变自然环境、影响生物栖居及当地居民生活等。
- 面对争议问题，需要制定道德准则来进行权衡。但道德问题不能简化为一套明确涵盖所有情况的规则，因此，工程教育

中需要引入伦理学教学，工程师要明白自己扮演的核心角色和承担的道德责任。

ENGINEERING
A BEGINNER'S GUIDE



我“修”故我在：工程学与知识

工程学涉及哪些技术之外的知识？

工程学只是单方面地利用知识吗？

工程学对科学知识的进步有何贡献？

工程知识有什么独特之处？

因为工程师处理复杂世界中的复杂问题，所以他们需要利用有关自然、社会及社会习俗的知识，甚至是有关个人思维方式的知识。本章将概述所有工程师都需要了解的非工程学知识。

工程师并不是单方面地利用其他学科创造知识，这种关系并不是单向的，工程学对科学知识，以及人们对自然界的认识和理解也做出了重大贡献。检验科学理论总是需要在越来越精细的实验中使用仪器，随着科学的发展，也就需要有设计和构建这些仪器的复杂工程。工程学甚至有助于开发更好地了解人类思想和行为的手段。

本章的最后一部分对工程知识的本质以及独特之处进行了一些反思。虽然工程学充分利用科学和数学知识，并在内容上与这些学科有很多重叠，但工程学包含更多的内容，工程师知道的也更多。

工程学所必需的非技术知识

工程师需要利用广泛的知识和认知。前几章已经讨论了科学和数学在工程学中的地位，而且从对工程学的讨论中我们可以看出，如果不了解相关的科学理论和数学方法，工程师就不可能取得任何成功。但是工程并不完全是在实验室或计算机上完成的，工程的实践性要求工程师在现实世界中工作——在现实世界中，学科和学科之间没有明确的界限。开发用于计算机的半导体、建造输油管道等工程任务，标志着一系列不同学科之间的碰撞。这意味着，即使工程师不具备所有学科的知识，至少也要认识到这些学科的重要性。更重要的是，他们需要知道什么时候应该请教其他专家，以及如何利用这些专家提供的知识和建议。

这与其说是有关知识的问题，倒不如说是技能问题。工程师利用他人的知识和发现，而其工程技能就体现在找到合适的领域，并根据获得的信息采取适当的行动。这包括寻求科技领域之外的专门知识，如工程师可能需要律师的服务，为复杂的建筑项目起草合同或协议；或者需要征求考古学家的意见，以便在保护文物古迹方面能够采取正确的、谨慎的做法。在这个复杂的世界中，当地环境的诸多因素和方面影响着工程师所从事的工作，为了能够在这种复杂的世界中顺利完成工作，他们需要利用这些知识。然而，所有工程师必须掌握一定的非技术领域知识，才能取得成功。

我们已经看到，工程师必须处理涉及诸多因素的系统、复杂工件和

过程，而且，这些因素包括有生命的、独立自主的人类。火车是由人驾驶的（借助自动化程度不同的控制系统），它载有乘客，停在通常由人力控制的车站，车站上也到处都是人。[1] 列车的设计基于广泛的工程学知识，其中主要是机电工程的知识，包括如何开发清洁高效的发动机以拉动一定长度的列车，如何设计列车才能改进其空气动力特性，以及如何引入系统才能减少因驾驶员失误而发生的事故。第三个例子表明，工程师显然需要了解人的行为方式。要设计列车的控制系统，必须了解驾驶员如何操作列车，哪些控件易于操作，哪些控件难以操作或容易出错。

在很大程度上，沿固定路线行驶的客车（如火车和有轨电车）的自动化程度越来越高，驾驶员更像是一种安全保障，而不是操作人员，也就是说，驾驶员的存在是为了在出现问题时采取行动，而不是从头到尾操控一切。但是，设计这些自动化车辆时，工程师仍然需要了解驾驶员的角色，了解他们可能的行为方式和思维过程。如果火车的驾驶室自动化程度极高，驾驶员会因无聊而反应迟钝，无法在紧急情况下采取行动，那么高程度的自动化就会适得其反。在设计人机交互的工程系统时，必须考虑到这一点。

操作人员并不是工程系统中唯一的“人为因素”。比如说，设计客车还必须考虑乘客的舒适和方便。工程师应具备的一个关键的心理学知识是了解乘客在事故中的行为——设计安全的列车，取决于了解出故障时人们会做什么。研究“人为因素”就是研究这种行为，工程师可以利用这些人为因素，确保在合理的逃生路线上存在最小的障碍，或者在出口路线上设计障碍，以降低危险行为的可能性或阻碍行为发生。例如，在飞机的疏散过程中，拥堵不仅是因为人们无法打开紧急舱门，还是因为人们往往会为了自己先出去而踩踏别人。工程师需要考虑人类在这种情况下的行为，并通过设计尽可能控制这种行为。

工程师需要了解人类，因为他们创建工程产品就是为了满足人类的需求，如果他们不了解这些需求，就无法成功地实现其设计目的。但认为工程师总是能了解人类，还是略显牵强。大多数人遇到过不太简易的技术，这些技术明显不易操作。技术的设计往往不考虑用户，用户常常需要学习和调整才能适应，这常常会带来严重的负面影响。计算机鼠标就是经常被引用的一个例子，许多人觉得鼠标用着不舒服，而且不良的姿势还会导致重复性劳损。这不足为奇，因为鼠标最初于1963年由道格拉斯·恩格尔巴特（Douglas Englebart）设计，之后很久，人们才开始在

电脑前花一整天时间操作鼠标。事实上，他们大部分的闲暇时间也在做同样的事情。改进工程设计的关键是更好地理解人们的生理和心理机制，这里的人们应该包括所有可能的用户，男性工科研究生与退休女护士跟科技互动的方式可能截然不同。

本书最后一章将指出，决定工程产品成功与否的非技术因素有很多，在工程行业中，工程师不应该认为自己是被动的因素，一味等着确认各种条件是否适合他们的发明蓬勃发展。相反，他们需要掌握一定的技能和经验，才能开发出更有可能在市场上占有一席之地的产品。这需要他们了解什么产品可能对客户有吸引力（因此，心理学的知识在这里也会派上用场），以及在特定的时间里什么产品可能会有市场；这还需要工程师懂得如何以极具竞争力的成本制造产品。将一个想法转化为符合市场需求的产品就需要想办法制造价格合理的产品。世界上最具创意的技术，如果成本太高或制造难度太大，就很难有立足之地，这同样适用于大型全球市场和为特定地区生产的产品。工程师可能在为偏远社区设计净水设备或卫生设备，工程师成功与否就取决于他们是否了解这些地区与其他地区在需求和资源方面的差异。[2]

工程创新往往得益于商业创新的支持。谷歌如何成功地将一个数学过程转化为一个工程系统，这个故事在一定程度上已为人们熟知，但是，能够将数学函数的简单应用转化为一个大规模运作的过程，并不是谷歌成功的唯一原因。谷歌之所以产生如此巨大的影响，是因为他们想出了从中赚钱的办法，这样布林和佩奇就能吸引投资者，并创造出一个有增长潜力的真正的企业。他们赚钱的方式和搜索的方式一样独具匠心，关键是不能损害搜索结果——任何人都不应通过付费而登上搜索榜首。因此，他们在网页上添加了赞助链接，这些链接可能独立于搜索结果出现，但也会链接到搜索结果，公司通过竞拍出价获得赞助链接，点击某些搜索词时，这些链接就会出现。

相比而言，有些搜索词更有价值，例如“酒店”一词很值钱，“热力学”就不那么值钱了，我之所以知道“热力学”价值不高，是因为我在搜索栏输入“热力学”时，并没有出现赞助链接。这很可能是因为在谷歌上搜索“酒店”一词的人很可能是在寻找在线预订网站，而搜索“热力学”的人可能只是在寻找有关这个主题的更多信息。在指定搜索结果上竞标广告空间不是由谷歌率先实施的，但正是他们认为这是通过搜索过程赚钱的方法，这也为他们提供了一个商业模式，使谷歌在实现其技术功能的同时又能赚钱。要想把好的想法转化为成功的产品，这种商业洞察力至关

重要。工程师想解决的每一个问题都有很多办法，而商业可行性是决定哪些解决办法能够成功的关键因素。

从国际能源供应协议到摩天大楼的规划许可，全球和地方政治在工程领域发挥着巨大的作用。[3]

巴库－第比利斯－杰伊汉（Baku-Tbilisi-Ceyhan，简称BTC）管道，穿越三个国家，把石油从里海输送到地中海，该管道由英国石油公司牵头的一个联合企业建造，起点在阿塞拜疆首都巴库附近的桑加哈尔，途经格鲁吉亚首都第比利斯，到达终点，即土耳其的杰伊汉。在管道开发时，一些政治问题制约了可能的路线。

由此可见，管道路线的规划充满了政治阻碍。在考虑这条路线时，政治因素与地理和经济问题同样重要，要理解这些问题，工程师只能靠自己。许多工程项目在较小的范围内处理这些问题，因为它们涉及不同利益相关者的利益。这些利益相关者包括为其构建系统的客户，以及更广泛的社群，诸如环保行动小组的特殊利益团体等。工程师不可以，也不应该认为这些因素超出了工程师的关注范围。如果工程学的目的是提高人类的生活质量，那么在工程进程中，就不能忽视人类的利益。

追求知识：支持科学发展的工程学

科学的中心目标当然是发现更详细的自然界知识，而工程学在支持人类拓展科学知识方面起着重要作用。已有证据证明，许多工程技术对很多不同的科学分支都有所助益，或者对科学发现产生了意想不到的积极影响。扫描电子显微镜是由剑桥大学的工程师们开发出来用于商业用途的，而如今已经成为各个科学领域的研究人员必不可少的工具。计算机的计算速度与计算能力飞速发展，使计算机可以进行越来越复杂的数据处理、计算和预测。正是由于计算能力的发展创造了必要的条件，人类基因组的测序才从理论上的可能性变成了现实，从而可以对基因组进行进一步研究，但如果没有工程工具，这就是天方夜谭。

通常，工程师和科学家会组成一个团队进行合作，从事特定的研究项目。位于日内瓦的欧洲核子研究组织是实验物理学家和工程师之间合作的摇篮，有许多实验团队从事不同的项目，其中最引人注目的是大型强子对撞机（Large Hadron Collider，简称LHC），它于2008年9月首次投入使用，其中主要研究目的之一是解开粒子如何具有质量的谜团，并确定迄今构成宇宙绝大部分的神秘物质的组成成分。

大型强子对撞机带来的工程挑战，在很多方面是经典的工程难题，但它们产生于不同寻常的背景，有着不同寻常的目的。对撞机由一个27千米长的圆形隧道组成，粒子在隧道中加速后，通过4个单独的探测器。建造对撞机带来的最重大的工程挑战之一是，这种高度敏感的设备必须安装在地下，处于保护良好的环境中。对撞机中的粒子受到超导磁体的影响而加速，而超导磁体仅在接近绝对零度时才起作用。创建可以一直维持这种临界温度的保护环境对设备的可靠性至关重要，确保这种可靠性是工程师所面临的主要挑战。

在大型强子对撞机中进行的实验不能随意停止或启动，在将系统重新投入运行之前，必须进行故障微调，因为系统所包含的部件在系统几个月不关闭的情况下是无法访问的，所以必须对系统进行设计，使其一旦启动就可以可靠地工作。就像卫星在执行任务时需要保证它们在孤零零的飞行任务中持续工作一样。

第一次启动后不久，对撞机就出现了故障，导致它停止工作了数月。对于相关的工程师和科学家来说，这些故障可能让他们感到沮丧（无疑也令他们难堪），但对于这样一个复杂而敏感的系统来说，这个结果是可以预见的。建造大型强子对撞机的工程师的经验，实际上证明了工程师在项目中的重要性，并表明大型实验是对工程师和理论家工作的艰难考验。“大科学”为科学家和工程师开辟了未知的领域。

然而，大型强子对撞机并不是世界上唯一的粒子加速器，事实上，许多粒子加速器并不是用作对撞机，而是用来产生强烈光束的，这些光束在各类实验中都有广泛的应用。同步加速器产生的光束可以透过材料样品来揭示物质的结构，它们提供了一种观察各种材料结构的方法，在材料科学、生物学甚至医学等很多科学领域都有着广泛的应用（见图5-1）。虽然同步加速器是基于对基本粒子的行为和性质的理论理解而建造的，但建造和操作这些设施是工程师的任务。科学家们设计实验是为了回答他们的理论提出的问题，但没有工程学的成就，是不可能回答现代科学提出的问题的。

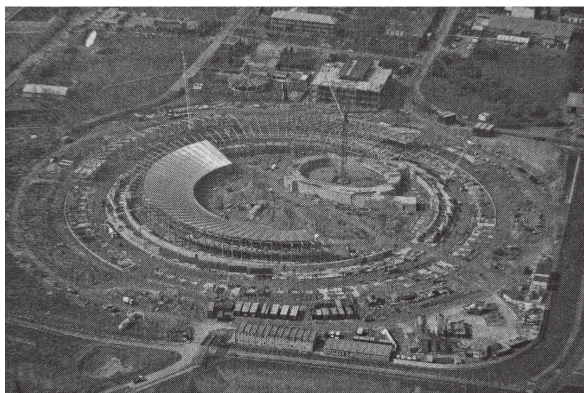


图**5-1**　钻石光源

正在建设中的英国国家同步加速器设施——钻石光源。照片拍摄于2004年4月，英国牛津郡南部哈威尔科学与创新园区。

资料来源：钻石光源

工程学在支持理论科学方面的作用由来已久。在13世纪，天文学的发展使人们需要更精确的测量仪器来绘制天体的运动图。精密工程是机械工程的一个领域，致力于生产高精度、高均匀性的机械零件和其他工件，该领域起源于制造高精度测量仪器的技术。

精密工程在精度方面取得了令人惊叹的进步，人们很容易就能观察到这个领域的工程进展。这个领域中的一个重大飞跃是1774年约翰·威尔金森（John Wilkinson）发明的钻孔机，它可以打出直径为1270毫米的孔，误差仅为1毫米，这对开发高效的蒸汽机至关重要。如今，机械加工的精度可以达到纳米尺度，到100纳米或更小。精密工程的这一进展使它能够支持诸如宇宙学等科学的持续发展。

重力探测器B是在2004年4月发射的，它的设计目的是测量时空曲率，以检验爱因斯坦广义相对论所做的预测。要做到这一点，探测器需要高精度的陀螺仪来检测探测器的方位变化，从而揭示其所处时空区域的曲率。预测到的方位变化微乎其微，因此陀螺仪必须非常敏感。实现这种灵敏度的核心是构成陀螺仪零部件的球形转子须极其光滑。它们的光滑度越低，重力探测器的结果就越不准确。这些球形转子由石英制成，抛光后形成大小均匀的约3.81厘米的球体，由于几层原子的存在，球体达不到完美的光滑度。

这种精确度水平反映了现代精密工程的标准。在现代精密工程中，高精密度和敏感的元件是为高科技仪器制造的，例如照相机、计算机等。由于与仪器制造者有直接联系的工程技能得以发展，宇宙学和天文

学才发展成可以真正揭示宇宙基本性质的科学。从为了建粒子加速器而挖掘土地的土木工程，到高速计算的发展，这些例子表明，工程学不仅运用了科学，实际上还促进了科学的发展。如今，科学家们所做的大量实验工作对工程学的依赖，可以说至少和工程学对理论和实验科学的依赖程度是一样的。

工程师不仅制造仪器供科学研究使用，他们还可以把自己的方法应用到其他科学领域中。系统生物学是一个研究领域，它为医疗保健提供了一种革命性的方法。许多医疗科学都基于对人体各个部位，以及影响单个器官或细胞类型的疾病过程的理解。在20世纪，分子生物学的兴起极大地影响了人们对人体的理解，让人们通过分子基本组成的特性来理解生命。但人体是个复杂的系统，我们显然需要了解人体作为一个整体是如何运转的，不同器官是如何相互作用的，以及分子层面的过程是如何影响细胞层面或器官层面的，反之亦然。

工程师对复杂系统的理解日益成熟，为描述和建模此类系统而开发的技术可能在生物学和医学中发挥了巨大作用。工程师所利用的数学方法，在描绘人体各级组织中进行的各个过程之间的复杂相互作用方面，尤其发挥着重要作用。自人类基因组测序得以实现以来，我们就有了“潘多拉的盒子”，可以用来更好地理解个体的生物学特性，了解如何设计治疗方案才能更好地与个体匹配，还可以了解个体与特定疾病的对应程度，从而为积极预防疾病带来希望。随着计算机处理速度和计算机内存容量的不断增加，我们希望能够利用有关每个人身体的大量潜在信息，更好地了解身体是如何运转的，以及如何衰退的。

有时工程师必须像科学家一样发展自己的科学理论。工程问题可能会自己出现，这些问题需要直接调查，而不需要现有科学的帮助。克劳德·香农（Claude Shannon）是实现了通信技术重大创新的电气工程师，他被认为是信息论应用科学的发明者。信息论的应用是寻找一种方法，使传送的信息通过有干扰的信道。他遇到的问题是找到一种传送信息的方法，即使在传送过程中丢失了一些信息，也可以在目的地进行解码，他通过研究交流的本质来解决这个问题，并从研究人类使用普通语言进行交流的方式中获得了灵感。他指出，即使我们没有听到句子中的每一个字，通常也能理解说话的要点。他利用这一发现，开发了压缩数据进行传输的方法。香农的研究促进了信息论学科的建立，解决了一个工程问题，也突显了人类交流方式中有趣的方面。在仿生学领域，工程师模仿在技术开发中发现的自然机制，这又是一个工程师像科学家一样直接

研究自然界的例子。通过这种方式，工程师可以在解决自己技术问题的同时，揭示科学所感兴趣的现象。

哲学工程：了解我们的思想

鉴于工程学的重点是开发能产生实际成果的产品和系统，工程师们似乎不太可能与哲学家开展卓有成效的合作。但事实上，工程产品，甚至工程师的工作方式，都能给哲学中一些经久不衰的问题带来启示。工程方法和具体的工程工具可以解释有关人类思想运作方式的一些哲学和社会学问题。

例如，哲学家担心，人如何才能知道真实世界的存在，以及它是什么样的。他们想知道人如何才能确定自己不是在幻想周围的世界，或者这个世界不是由操控性的实验者精心创造的虚拟现实。但是当哲学家问这个问题时，他们常常考虑人从知觉体验或对周围世界的观察中得来的知识。他们关心的是，人如何才能知道自己的体验是真实的，以及从这些体验中得出的事实知识是真实的。当哲学家提出这样的问题时，他们假设在人所观察的世界（表象）和世界形成的方式（现实）之间有某种鸿沟或差距需要弥合。但在实践知识中，尤其是在工程师精湛的技能中，这种差距并不明显。

例如，哲学家们担心我们如何才能知道别人有思想，有自己所拥有的“个人”内心体验。我们怎么知道他们不是行为设计得像我们一样，却没有颗有意识的内心的机器人？这种怀疑之所以出现，是因为人们认为身体行为和内心想法之间似乎存在着一个缺口需要填补，解释内心想法如何神秘地导致了外在的行为。神经科学为填补这一缺口做了大量工作，它详细描述了大脑中产生身体行为的过程。而生物医学工程，也就是创造了像前文描述的仿生手那种装置的学科，做了进一步的工作。对个人意图产生反应的假肢的发明提供了一个不同的视角，来让我们看待内心与身体之间的关系。这种假肢的设计和安装需要干预把思想和意图等心理事件与身体行为联系起来的过程。如果我们能制造出按照病人的思想来运转的物理装置，我们不就成功地控制了精神和身体之间的关系吗？如果设计的装置能够以这种方式工作，那么，这无疑减少了哲学上对内在思维和外在身体行为之间的密切联系的怀疑。

机器人技术也是工程学的一个领域，它在哲学和心理学的边缘进行探索。许多机器人技术可能专注于开发工具来执行重复的任务（如工厂

里的装配线机器人）或者精确度要求很高的任务（如机器人外科医生）。但是，机器人技术中有一个领域与人工智能的研究相关联。在这一领域，研究人员对模仿人类的行为、决策过程甚至行为举止都非常感兴趣，这需要理解人类智力的本质，甚至意识的本质。而且，事实证明，哲学家和工程师之间的合作在这一领域很有启发性，但这种合作可能不仅仅局限于工程师倾听哲学家的观点。随着工程师在开发机器人系统方面做得越来越好，这些系统展示的活动越来越接近于可能是智能或表明意识的行为，他们可能会给哲学家上一课。从系统的组合方式中，我们可以更多地了解系统，如果工程师能够成功地构建一个智能的或有意识的系统，他们就会掌握这些神秘属性本质的秘密，这是任何纯粹的哲学理论都无法做到的。[4]

软件工程产品也为社会科学的发现提供了机会，它们建立实验室，在其中可以观察、了解，甚至操纵人类的行为。洞穴式自动虚拟环境创造的虚拟环境，可以通过不断调整来观察人类在不同环境下的行为细节。它的工作方式为，把图像投射到立方体形状的房间的墙壁上，让身处其中的对象体验到有趣空间的三维再现，这样实验者就能观察到人们在不同的环境中的行为。这样做非常简单，就像观察人们如何在超市里走来走去、如何与产品互动一样，这对于决定把最有价值的产品摆在超市货架的什么位置是很有用的；或者，也可以观察人们在紧急疏散时的行为。随后，这些研究可以用来设计空间，以便利用人类的自然行为，比如让别人拿起你的品牌巧克力，或者在建筑物里设计紧急出口，使其便于使用，不会造成拥挤。当然，这些知识对工程师和心理学家一样有用。因此，即使在“软”社会科学或心理学领域，工程学也不仅仅是利用知识，它还在用心地帮助创造知识。

工程知识的独特之处

在研究了工程学与形成了专业知识的各个学科之间的关联之后，我们有必要问一问，什么是工程师知道而其他学科的专家所不知道的呢？工程知识与其他学科创造的知识不同吗？工程学究竟是产生知识，还是仅仅为了制造工件而运用知识呢？

显然，工程学本质上是实践性的，而不是理论性的，它重点关注以可靠的系统、产品和过程的形式呈现的事物的发展，而不是事实。工程师运用自己的能力，设计、测试并制造所需的产品，从而实现这个目

标。这里的关键概念是能力或技能，这是工程学领域的精髓。虽然成为一名实验科学家或数学家或物理学家无疑需要很多技能，但知识是他们的主要产物和工具。然而，工程师在掌握大量数学和科学知识的同时，也应有能力解决他们遇到的问题。他们有能力弄清楚需要什么样的解决方案，如何设计这样的解决方案，以及如何将设计转化为实体对象——不管是亲力亲为，还是指导他人完成。可以说，工程师所掌握的就是技能。

研究知识本质的哲学家把“知道怎样做”和“知道是什么”进行了对比。我知道叶绿素使植物变绿，金的原子序数是79，铜是电的良导体，我可以和别人核对这些事实，也可以把它们写下来并传承下去。我也知道如何骑自行车，如何调整自行车的刹车，以及如何组装一辆自行车，这些不是我能回忆起来的事实，而是我可以实践的技能，我可以向别人解释如何做这些事，但只能解释到一定程度。例如，虽然我可以用某种方式描述如何调整自行车的刹车，但很难解释如何骑自行车，人们阅读了我的描述也不会理解如何调整自行车的刹车。只有他们能正确地调整自行车的刹车，能够运用这些知识时，他们才能掌握这种知识，这种知识一般是通过实践获得的。组装自行车也是如此，我们可以写下很多操作说明，但仅仅阅读这些说明并不能获得这种能力，我可能读了一本关于组装自行车的书，但你并不认可我知道如何组装自行车，除非我能成功地完成组装——我只能通过行动来证明这一点。

工程学建立在这种技能基础之上，而且对这种技能的了解至关重要。知道如何把螺母拧紧到合适的程度，而又不拧得太紧，这或多或少是一种用语言难以形容的技能，这种技能经验，基于的是对合适程度的感觉。使用扳手拧紧螺母并不是工程，但许多工程产物的成功取决于掌握了这种隐性方法的人。应用数学方法和计算可以发展桥梁设计，但桥梁的安全性和功能性在很大程度上取决于施工人员的隐性知识。

关于技术人员在工程中的作用，这里有一点值得一提。我们通常会区分设计和管理项目的工程师与从事生产、项目交付和产品维护中所涉及的操作具体实践任务的技术人员。特别是在英国，因为技术人员常常自称工程师，这种区别多少有点模糊，例如，修理故障电梯的技术人员称自己为“电梯工程师”。工程界有时担心，技术人员使用“工程师”这个名称是一种误导，甚至是有害的。普通民众会把工程与涉及手工修理机械零件的技术人员的工作等同起来（“engineer”和“engine”之间的联系在这里没有起到作用）。

然而，帮助实现工程设计人员的规划并维护工程基础设施的技术人员，对于工程来说是必不可少的，自工业革命以来一直如此。萨利·杜根（Sally Dugan）在她的著作《铁人》（*Men of Iron*）中这样描述布鲁内尔父子的同事亨利·莫兹利："莫兹利掌握的工艺技能是从书本中无法学到的，如果没有他的专门技术（口头传授给他的学徒），布鲁内尔父子的两项设计仍停留在纸面上。"这不仅仅是莫兹利简单地按照布鲁内尔父子的设计图来建造，具体化他们的愿景的问题。布鲁内尔父子所做的各种设计都很新颖，建造起来也并非易事，它们要求实施者懂得如何建造高效和高质量的机械，以及如何使这些知识适应新设计。这不仅需要认识到运用可互换的统一部件来制造机器的重要性，还需要有能力制造能够生产这些可互换部件的机器。莫兹利是制造机床的专家，他的专业知识不是来自理论学习，而是来自学徒训练，他是从经验中学习的。

尽管莫兹利的经验来自手工艺，但他仍跻身于伟大的工程师的行列（他通过当锁匠获得了自己的技能）。然而，是从事日常施工和维修工作的技术人员在工程学的发展中发挥了核心作用。为工程项目献出了生命的人几乎全来自这些阶层，而且，虽然很多国家已不再容忍胡佛水坝等项目中的死亡人数规模（其中有114名工人丧生），但技术人员仍继续为完成伟大的工程设计而付出艰苦的努力。2008年北京奥运会的核心建筑——鸟巢体育场，由英国奥雅纳公司的工程师将建筑设想转变为工程现实，这些工程师利用他们可以使用的分析工具进行规划，以构建体育场外部的复杂编织结构。但是，正是焊工在高处不好操作的位置上无数小时的艰苦工作，才将这些规划变为实体场馆。因此，工程技术人员的技能和专门知识是工程知识的重要组成部分，这些知识只能通过从事工程项目而获得，而且这些知识对于完成这些项目至关重要。

工程方面的作家强调，通过经验学到的技能比口头传授的知识更重要。詹姆斯·亚当斯在他的著作《飞拱、熵和O形环》（*Flying Buttresses, Entropy and O-Rings*）中写道："有些工程师很难与数学家和科学家区分开来，他们运用深奥复杂的理论和功能强大的计算机从事工作。其他工程师又很像技术人员，他们采用务实的亲身实践法，有一种近乎神秘的正确感，根据经验，凭感觉和直觉进行工作。"即使是在设计和项目管理层面上做出的决策，也往往依赖于隐性的实践知识，预测和诊断系统中的故障需要大量的工程经验。可能出现的故障模式的不确定性意味着，永远不可能简单地列出可能的故障模式，从而通过背一套规则来学习辨别故障模式。工程师需应对的情况总是与他们以前遇到的有所不同：不同的客户，从事基于不同地理位置的项目等。因此，工程师所获得的经

验不能简单地归结为一套决策规则。许多工程学知识与上面所描述的基本知识有关，这种感知事物是否正确的能力有时需要经历痛苦后才能获得。

因此，正是技能使工程学知识变得独一无二。工程师与科学家的不同之处在于，他们不仅深知数学和物理理论，而且还知道如何应用这些理论，他们可以像科学理论的构建者一样，以严谨而系统的方式思考，他们也可以用系统思维创造为特定目的服务的系统。当然，这并不是说，所有的工程知识都是由工程师间不可言传的技能组成的。从工艺的地位来看，工程学的进步是由于开发了先进的方法，这些方法可以编纂成典，因此可以共享和传授。然而，工程师并不是通过阅读别人的经验教训而造就的，要成为一名工程师，就要进行工程实践，掌握实用的工程知识。

章后总结

- 除了工程技术以外，工程师需要了解很多学科，至少明确这些学科的重要性，在需要的时候去获取信息。工程实践不止需要技术和科学理论，还涉及法律、考古学、人体生理学、心理学等诸多方面的知识，工程设计需要商业洞察力，还需要考虑政治因素。工程师必须利用广泛的知识。
- 工程学并非单方面地利用知识，还帮助创造知识。工程学创造出的科学仪器对科学研究至关重要，它们推动了知识的进步。工程学在机器人、软件等方面的贡献，还可以帮助理解人类的行为和意识，进而解决困扰哲学家的意识问题。
- 工程学知识的独特之处在于技能。工程本质上是实践性的，而不是理论性的。

A BEGINNER'S GUIDE

ENGINEERING



传承与发展：工程学的过去与未来

工程学带来了什么问题？

工程学面临着什么样的挑战？

工程学能采取什么方法应对挑战？

本书的结尾将展望工程学未来面临的挑战，这并不是要概述即将改变工程学未来的“前沿”技术。工程学和技术变化之快，以及影响工程学发展的因素之多，意味着不久之后，任何预测都会过时或者成为无稽之谈。相反，本章将探讨工程学所面临的挑战，这些挑战要么是由于它的遗留问题，要么是由于人们使用工程产品的方式而带来的。

前几章展示了工程学如何塑造了自然景观和人们的生活方式。然而，由此带来的当地和全球环境的变化已经造成了一系列全新的问题，亟待工程人员解决。第一，世界上很大一部分人口依赖如交通网络、通信系统等工程基础设施来支撑他们的日常生活，这意味着，对于工程师来说，他们的一项重要任务就是维护基础设施，使其不会因持续使用的压力而崩溃。工程师还必须对基础设施面临的外部威胁保持警惕，并需要采取对策，防止这些设施受到攻击。第二，毋庸置疑，工程师的工作产生了负面影响。大量的工程活动造成了局部和全球范围的污染，人类活动导致地球大气层中二氧化碳含量的增加，对气候模式造成了威胁，并可能对人类生活产生巨大影响。随着一些国家努力为其人民提供舒适的现代生活，导致二氧化碳增加的工程活动可能会增多，例如发电、自驾旅行、航空旅行，以及越来越现代化的耗电设备的使用。虽然这些负面影响不是工程师自身的“过错”，而是人类行为的结果，但不可否认的是，世界上温室气体中的很大一部分是由工程技术产生的。

在工程已经改变了人类生活的那些地区，工程师面临的挑战是维护工程基础设施，以保持生活质量，并采取不会继续污染全球环境的方式发展工程基础设施。其他地区面临的挑战是建设对当地和全球环境造成最小损害的可持续基础设施。本章将阐述这些挑战对工程学的意义。

基础设施老化

工程基础设施面临着许多威胁，工程师必须保护基础设施，使其免受这些威胁。在像英国这样的国家，支撑人们生活的工程网络几乎总是以满负荷的方式运行，刚好能提供所需的服务。基础设施高效运行是件好事，但重要的是要留有备用的容量来处理意外的事件，不幸的是，人口增长和人口集中在城市地区意味着这种闲置能力不断被蚕食。

19世纪，美国和欧洲的基础设施建设蓬勃发展，公路和铁路网迅速发展，供水和污水系统为满足现代城镇的需要进行了重建，大多数国家

经历了旨在满足当时人口需要的住房快速发展时期。所有的基础设施面临着一系列的威胁。

最明显的问题之一就是时间的流逝。工程系统的预期寿命或多或少是固定的，没有什么东西建成以后可以永存。但是，工程产品已深入城镇，维护和更新一直是个令人头疼的问题，为家庭和企业供水和排除废水的水管及下水道因年久老化和长期使用而受损，而更新这些水管和下水道的过程可能意味着大规模的破坏，要挖掘繁忙的道路，中断运输网络的运行。但这些都是不能冒险的基本服务设施，因此必须进行侵入性操作才能保持其正常运转。

随着时间的推移，基础设施必须满足人口变化的需要，为特定规模的人群建造的系统最终往往要承担更大的用户群体的负担。交通系统极易受到用户数量增长的影响，越来越多的通勤者挤在火车上，越来越多的驾驶员造成道路交通堵塞。在不可能建立额外容量的情况下，必须仔细管理这些系统，以满足人们对系统提出的要求。目前，英国的道路系统由数千台摄像机监控，这些摄像机与一个控制中心相连，控制中心监控交通状况，一旦发生事故或交通堵塞，就会做出分流或中止交通的决定。虽然公路系统本身的发展必不可少，但建立能够充分利用现有能力的智能系统也极其重要。有潜力的智能系统就是全球定位系统（GPS），许多驾驶员用GPS导航，帮助他们做出选择，改进自己和他人的旅程。通过获取和使用各种道路上的空余容量信息，驾驶员自己可以更好地管理交通；有关部门可实行道路收费，以减少繁忙时段的出行，或者通过降低收费来使某些路线更受欢迎。随着交通网络越来越繁忙，需要的智能化程度也越来越高；用户也需要发挥自己的作用，驾驶员可以相对自由地选择自己的出行时间和路线。为了更好地管理道路状况而传递相关信息的系统，只有在人们根据这些信息采取行动时才会发挥作用，这取决于道路使用者之间的一点点利他主义，至少在开发自动驾驶汽车之前是这样的，自动驾驶汽车可以根据传递给它的信息自行决定路线并改道。

气候变化的影响给已建成的基础设施带来了重大问题。夏季酷暑可能会产生对空调的需求，而电力网络无法跟上这一需求，并且能源消耗的增长又加剧了气候问题。英国在20世纪初建造的砖房并不是为了隔热或御寒，在遇上极端温度时需要加热和降温，这就形成了一个恶性循环，加剧了气候变化的影响。在全球范围内，气候变化正在影响天气模式，并可能导致更频繁的极端天气事件，这些事件，再加上人口的变

化，对城镇处理废水的能力产生了巨大影响。2005年卡特里娜飓风造成的破坏性影响表明，当防洪设施不堪重负时，就可能会遭到破坏。2007年夏天，洪水席卷了英国，冲毁了人们的家园，导致电力和供水系统瘫痪，造成这种情况的部分原因是，雨水渠无法应对流入其中的水量，因为它们的设计初衷并不是为了应对这种罕见的洪水突发事件。废水系统需要进行改造，以应对与建造时所预见的大不相同的天气模式。

此类系统的有效性还取决于基础设施中其他明显不相关的因素。无论是道路、停车场还是私人车道，随着越来越多的景观铺设在或覆盖在混凝土上，雨水渗入地面的难度越来越大。而且，雨水会迅速从这些坚硬的表面流入废水系统，而废水系统无法应对雨水的激增。解决这个问题的创新方案包括铺设更多"绿色屋顶"——在大型建筑物的屋顶上覆盖草坪或景天植物，雨水会渗入这些天然屋顶覆盖物，并以比从硬屋顶渗入慢得多的速度进入排水沟，这些屋顶覆盖物还具有为其覆盖的建筑物提供隔热功能的优点。这是体现基础设施系统复杂性的一个很好的例子：从整体上看，一个国家某一领域基础设施的变化会对另一个领域产生影响，无论影响是好是坏，都难以预测。

恐怖主义也是对全球基础设施的潜在威胁。随着恐怖袭击变得越来越复杂，恐怖分子有能力破坏关键基础设施，造成巨大的破坏。例如，干扰一个国家的GPS系统（这对满足人们的日常需求似乎没有那么重要）也可能造成混乱，救护车和应急服务无法到达需要的地方。我们对技术驱动的基础设施的依赖使我们更容易受到袭击的影响。工程师的任务是尝试设计尽可能可靠的系统。

然而，当运输、公用事业和通信网络必须满足其设计者可能没有预见到的需求时，可靠性很难通过设计达成。工程师必须放眼未来，创建既能满足当前需求，又能适应需求变化的系统，这种远见卓识难以开发，但研究未来可能的情景是工程师和政治家都可以从事的工作。公共政策和公共基础设施方面的专家可以而且必须积极发现未来可能出现的问题，并为它们进行规划和设计，而不能陷入幻想中。工程项目所涉及的时间跨度不能由短期政治目标或商业目标所左右，工程领域未来面临的巨大挑战之一就是展望未来的挑战，包括那些意想不到的、隐藏的黑暗角落。

工程能力

工程师在许多方面成功地实现了他们的目标，即改善人民的生活体验。人们可以享受可靠的热量、光线和水的供应，可以乘坐自己的汽车或乘坐公共交通工具快速、便捷地旅行；海外旅行对许多人来说，既便宜又方便。还有一些国家现在正在努力达到同样的生活水平，道路上的汽车数量正在迅速增加，发电量和发电站建设也呈指数级增长，建设的不断推进意味着地球上更多的土地被覆盖，而实现这一目标的过程既需要能源，又需要资源，还会造成污染。所有这些都在增加全球碳排放，并威胁到工程师为弥补过去一个半世纪对人类所造成的损害而做出的努力。

我们能说这种做法是错误的，应该停止吗？发展中国家是否应该实施工程师正在努力设计的更清洁、更有效的技术？我们是否应该利用这一机会来开发一种新的发电模式，一种可持续的、清洁的发电模式呢？持这一立场的论据很有说服力，但要求发展中国家实施昂贵且仍处于起步阶段的技术，从而阻碍发展中国家的进步，这样公平吗？有哪个国家能对另一个国家发号施令，要求它依赖目前不可靠和昂贵的可再生能源吗？这些问题很难回答。发展中国家的快速变化在很大程度上取决于它们是否有能力采用经过实验和检验的技术，有了这种能力就可以实现快速发展，而且无论这种快速发展可能带来什么，它都会使数百万人摆脱贫困，提高他们的生活质量。但是，如果气候变化导致世界大部分地区无法居住，那么这种生活质量的改善将是短暂的。我们必须想出折中的办法。

世界各地的工程师可以通过从事寻找清洁、高效和可再生的电力开发方法的项目来帮助和支持发展中国家。这是一个全球性的问题，如果得到解决，对发达国家和发展中国家都有帮助。下面讨论能源生产面临的机遇和挑战。

一个有前景的战略是，找到为发展中国家设计技术的方法，而不必走西方工程发展的道路。例如，非洲国家在规模、人口密度和开发可再生能源的机会方面与欧洲或北美国家大不相同，这就需要对他们所面临的工程挑战制定创新的对策。例如，在西方世界，通信网络是通过在相邻社区之间铺设电缆和电话线来创建的，这些方法不适用于像非洲这样社区小而偏远的地区。但是，非洲已经能够利用移动技术，使它们得以跨越英国通信网络的早期阶段，利用共享电话与偏远地区保持联系，并使用个人手机提供金融交易等服务，如转账、支付公交费用等。非洲发挥了利用现有技术的能力，开发了一种非同寻常的金融和通信基础设

施。

以新颖和可持续的方式发展基础设施的机会也出现在正在克服冲突和自然灾害造成的破坏的国家中。如果对重建基础设施进行真正的投资，工程师就能在一个国家的复兴中发挥至关重要的作用。例如，在发生冲突后的阿富汗，道路和桥梁得到迅速重建，但没有经过有效规划，因此仓促修建的道路和桥梁受到侵蚀而倒塌，从而引发了新的问题。[1] 工程师善于从过去的失败中吸取教训，全球也必须做出努力，确保在发展中国家建设或重建具有创新性和可持续性的基础设施。

从零开始？奥雅纳公司与生态城市

人们有可能创造出与发达国家完全不同的城市吗？这种城市的碳排放量会小得多，同时为居民提供高质量的生活。计划在上海崇明岛建设的东滩是一项试验，旨在测试是否能创建一个完全可持续发展的城市。上海工业投资有限公司决定在长江的一个岛上开发东滩生态城（见图6-1），并聘请英国奥雅纳公司为这座城市制订总体规划，该项目的目标是东滩的能源将由当地的可再生能源结合起来提供，包括风能、太阳能以及以生物质和可回收废物为燃料的热电联产的热电厂。东滩的设计做到尽可能节能，这样它就可以在能源方面自给自足。公共交通工具为由氢气或电池驱动的零排放车辆，不过这座城市的设计宗旨是使步行和骑行尽可能方便和吸引人。

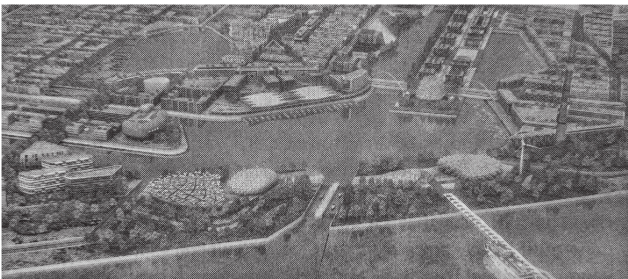


图**6-1**　东滩生态城

艺术家对东滩生态城的印象，由奥雅纳公司设计。

资料来源：奥雅纳公司

东滩将为居民提供尽可能多的食物，水的供应将由收集的雨水和再生水来提供，垃圾尽可能再利用和回收，或用于能源生产。实现这些宏伟目标的主要战略是为城市制定一个整体规划，充分利用

现有技术。

用这种方式建设城市无疑是创建可持续发展的高效城市的最简单的方法，而且不会因基础设施老化和能源效率低下的老建筑而受到影响，这些老建筑构成了许多城市的主体。

能源挑战

尽管绝大多数科学家一致接受了气候变化及其人为因素的证据，然而，就气温上升的确切影响而言，气候变化这一现象仍充满了不确定性，但正是这种不确定性让人们采取行动，而不能无所作为，因为我们承受不起经历预期结果中最糟糕情况的风险。应对提供安全和清洁能源的挑战，对于解决气候变化问题至关重要。

目前的工程方案可分为三类：一是利用可再生能源发电，二是设法使化石燃料成为更清洁的能源，三是重塑核梦想——有人在20世纪中期承诺的使用清洁、廉价的能源。下文简要介绍这些解决方案的优缺点。

利用太阳能是提供丰富可再生能源的一种方式。在21世纪第一个10年的中期，美国国家工程院开展了一项名为“工程学中的重大挑战”的项目，旨在调查20世纪工程师的主要目标，并确立那些被视为最重要的工程目标。在一项基于网络的民意调查中，使太阳能经济化的项目从包括防止核恐怖主义和工程药物等一系列挑战中脱颖而出。太阳能资源是丰富的，地球从太阳获得的能量远远超过其居民使用的能量，所以如果我们能够利用其中的一小部分能量，那么我们就可以拥有丰富的可再生碳中性能源。[2]

目前将太阳能转换成电能的技术并不能以合理的成本提供所需的电量，然而，正在开发的技术可能会改变这种状况，因为塑料电子领域有望生产出价格更低的太阳能电池板。另外，在没有这些技术的情况下，太阳能可以非常高效地直接加热水。运用太阳能的其他问题是，只有在某些地点才能产生大量的太阳能，并且，对于任何发电方式，储存和远距离运输都是问题，因为电力很难长时间储存。但对于像非洲这样急需能源解决方案的地区来说，太阳能具有潜在的前景，非洲甚至可以用撒哈拉地区产生的太阳能来满足欧洲的能源需求，并通过建立横贯大陆的“超级电网”进行能源分配。随着不断有人投资开发太阳能技术配电系统，太阳能可以满足世界大部分地区的能源需求。

太阳的能量可以通过多种方式获得，如果不是直接获得，那么从通过光合作用来储存能量的植物中也可获得。开发生物燃料（从植物中开发的燃料，而不是从石油、煤和天然气中提取的化石燃料）有助于我们解决能源使用的另一个问题。石油为大多数交通工具提供燃料，也是造成温室气体大大增加的重要原因。很多人宣称生物燃料有望代替石油，而乙醇等产品则是更清洁的石油替代品。这其实不是一项新技术，福特T型车可以使用乙醇或汽油，但汽油因相对便宜而成为首选燃料。

开发生物燃料用于电力运输，特别是在用于种植可转化为生物燃料的作物的用地方面，需要付出高昂的代价。此外，还存在的问题是，在一些极度贫穷的国家，土地面临着从种植粮食作物转向种植生产生物燃料作物的风险，从而导致粮食价格上涨和供应受限。因此，生物燃料的开发受到严重限制，虽然生物燃料可能是比石油更可持续的资源，但它仍然不能自由使用，甚至不能大量使用。如果采取控制措施，确保生物燃料来自不取代基本粮食作物的那些植物，那么生物燃料更有望成为替代能源。生物燃料还有望从废物中开发，例如用过的食用油，甚至制造巧克力的副产品，已用于为机动车提供动力。

风能和太阳能一样，有望利用免费的自然资源来发电。近几十年来，风能的使用量有了显著增长，但在大多数国家的能源供应中，它只占一小部分。阻碍风力发电发展的一个障碍是社会因素，有些人反对建风电场，认为会破坏自然景观，而且获得风电场的建设许可可能也是一个挑战。不过，位于海上的离岸风电场可能遇到的阻力较小。还有一个问题是，在大多数国家，风能目前无法提供主要的能源，因为它不是一种恒定的资源，如果天气发生变化，电力供应就会下降，甚至消失。同样，风能是间歇性的，而且只能在特定位置产生大量电力，这带来电力存储的问题，意味着利用风能的前景受到限制。不过，作为一种技术简单的清洁能源，风能还是具有很大应用前景的。

长期以来，人们一直青睐用煤发电，因为燃煤发电的过程易于控制，这意味着可以根据需求增减发电量。燃煤发电通过了技术检测，是一种可靠的能源生产方式，成本相对较低，而且根据目前的估计，现有的煤炭储量足以维持至少一个世纪（尽管这种预测极易受需求变化的影响）。然而，煤炭不是清洁燃料，这种发电方式造成了世界上很大一部分碳排放，那么，怎样才能让它在不破坏环境的情况下为我们所用呢？碳捕获和储存，或称碳固存，是将发电站燃烧煤炭释放的二氧化碳捕获，并将其埋在地下的过程。因此，碳将像核废料一样得到处理，安全

地储存在无法逸散到大气中的地方。虽然早期的示范项目是由德国的能源公司莱茵集团和加拿大萨斯喀彻温省电力公司进行的，但在证明此技术具有商业可行性之前，人们对它寄予了很大的希望。这项技术很重要，因为如果世界各地继续建造燃煤发电站，就必须采取一些措施来减少它们对环境的影响。然而，这并非没有风险。即使技术成熟了，人们也担心储存方法的长期可靠性，如果大量的碳突然一下子被释放出来，如果储存方法失败的话，真不知道将会发生什么。

正是这种担心，才导致了核能的发展。核能曾一度被认为是未来的发电方式，可以提供廉价而充足的能源。在法国，核能提供了绝大多数电力，但在其他国家，事实证明，核能并不受欢迎，最初的核能投资热潮也没有重来，这在很大程度上是由于核事故的威胁，以及对尚未解决的核废料储存问题的担忧。然而，随着英国和美国等国家计划建造新一代核电站，以及其他国家首次进军这一领域，近年来人们对这项技术的兴趣又重新燃起。其中一个吸引人的地方是，核能保证了安全可控的电力供应，一个国家拥有了自己的核资源，就不必依附于另一个国家来满足自己的能源需求，某些化石燃料的情况就是如此。在政治不稳定的时期，这是选择能源供应方式的一个极具吸引力的因素。还有一个主要的好处是，它是一种低碳的发电方式，有些人认为，迫切需要在这一领域进行投资，以遏制碳排放。不过，人们对这项技术仍然存在争议，这项技术没有办法避免产生放射性废料，而这些废料在几千年里仍然存在危险。这里要解决的问题既是一个社会问题，也是一个工程问题，那就是核废料造成的长期风险是否大于气候变化带来的风险。除非可再生能源的发电量逐步发生变化，否则核电很可能仍是重要的发电方式。

另外，有些人认为，核能的未来不在于现有的核裂变方法，而在于核聚变。太阳的能量是通过核聚变产生的，两个粒子融合并释放能量时，如果我们能够控制这一过程，利用所释放的能量来发电，那么少量的燃料就能产生大量的电能，而不会产生有害的废物。到目前为止，以这种方式利用能量的可靠方法一直难以实现，但研究人员仍在继续寻找产生电能所需的各种持续核聚变反应的方法。国际热核聚变实验反应堆计划是一项设在法国的国际研究计划，其重点是证明通过核聚变发电的技术可行性。这有可能成为一项革命性的技术，在这一领域的研究的确很重要，但对电的迫切需求使人们将其他已证实的能源主张已予以优先考虑。与ITER项目一样，如果许多国家想在不承担大量能源预算的情况下参与这项技术，国际合作至关重要。

显然，这些选择不是我们应对能源挑战的唯一全球解决方案，甚至也不是任何一个国家的唯一选择。大多数国家可能会综合利用这些技术，其中有些国家能更大程度地利用太阳能，有些国家能利用风能，还有些国家则利用碳捕获和碳储存技术。选择能源供应的方式是一项政治决策，这项决策对一个国家的稳定和安全至关重要，但也必须从工程现实出发。工程师必须参与能源问题讨论，清楚地表明每种能源供应方案的优缺点，并在必要时参与研究和示范项目。

调节气候

虽然我们投入了大量精力寻找安全的低碳能源生产手段，但也有其他战略可以应对气候变化的影响，其中之一就是直接干预地球的气候，以控制大气中碳含量增加对全球气温的影响。地球工程是一个新兴的工程活动领域，致力于改变地球气候。

工程师可以通过两种方式改变气候，并试图阻止气候变化的进程，一种是捕获已释放到大气中的碳，阻止其加剧温室效应，另一种是减少阳光造成的气候变暖。第一种策略的例子是海洋施肥，包括刺激海洋中浮游植物的生长，这些浮游植物在繁盛时吸收二氧化碳。有些浮游生物死亡后会沉入海底，其所吸收的碳也随之留在了海底。

地球上的一些区域也可以遮挡阳光的加热效应。在某些火山喷发之后，我们可以观测到，这些火山爆发附近的地表温度变低，这是由于颗粒物释放到平流层造成的。在这个高度直接释放硫酸盐等颗粒物也可以产生同样的效果。

那么这些技术的前景如何？它们是应对气候变化的正确解决方案吗？这两种形式的地球工程都会带来不可预测的风险。改变海洋生物的平衡可能会对脆弱的生态系统产生未知的、潜在的灾难性影响，浮游植物数量增加产生的影响可能难以逆转；直接干预地球的气候也可能产生我们无法预见的不可逆转的影响。地球工程是一场豪赌。人们由此可能会得出结论，这应该是最后的选择。如果我们能够通过减少排放来成功减缓气候变化，这才是一条更加安全的道路。

结论：工程学的局限性？

在前文中，我把工程学的发展比作物种的进化，工程学飞速发展，

使人类能够超越自然进化的过程。我们不再单方面地适应生态环境，而是改变周围的世界以适应自己的需求，弥补自身的弱点。现在是物质世界不断进化以适应人类的局限性。

我们依赖工程和技术来解决生活中的不便，但在这样做的过程中，我们似乎已经改变了世界，使其不再能继续为我们提供舒适的生存环境。世界人口密集地区发生的变化改变了地球上基本未开发的景观——极地地区，这些变化还可能对我们赖以生存的气候和宜居地的天气模式产生深远的影响。要阻止全球变暖，需要立即采取行动，而工程学将在这方面发挥关键作用。我们面临着许多重大问题，而且我们需要只有工程学才能提供的大型解决方案。

然而，我们还需考虑到，技术解决方案不是前进的唯一途径。我们可能会采取像地球工程这样极端的手段来应对气候变化，这种想法令人担忧，它无疑会给自身带来风险，并且不能保证持续有效。在最坏的情况下，采用这样的策略可能非常必要，但将它们视为解决气候问题的灵丹妙药尚有风险，因为每个工程师都知道，解决任何问题都没有灵丹妙药。

解决我们当前问题的最佳方案既包括继续适应我们周围的世界，也包括努力适应自己的生活方式。工程师在社会中工作，并与社会合作，因而，任何工程解决方案都有人为因素，这意味着，在帮助工程师减少我们应为之负责的碳排放方面，我们必须发挥一定的作用。我们需要改变自己的行为，少依赖汽车，少乘坐飞机，有节制地使用家中的暖气和冷气，这将对减少碳排放和减轻基础设施的负担产生巨大影响。

在帮助工程师解决我们造成的气候问题方面，广大公众还可以发挥另一个作用。工程学可以为“拯救世界”做很多事情，但是，正如本章所示，有很多方法可以做到这一点，做出这些选择不仅仅是基于技术方面的考虑，而是要决定我们愿意承担怎样风险。我们是愿意承担新技术带来的风险呢？还是愿意承担气候变化所带来的风险呢？这也是抉择，我们是否愿意改变我们的行为，或我们是否愿意保持我们的生活方式，并投入大量资金、努力和希望来寻找应对气候变化的工程解决方案。工程师也是广大公众的一员，他们应该积极参与这些决策。工程师可能改变了世界，但社会和个人的选择在塑造世界未来方面发挥着至关重要的作用。

章后总结

- 工程学给各地区和全球都带来了环境的变化，造成了一系列亟待解决的新问题。第一，随着人口增长，原有的基础设施承担了越来越重的负担，工程师需要对其进行维护，同时还需顾及气候变化和外部袭击可能造成的影响。第二，大量的工程活动造成了局部和全球的环境问题，工程师需要寻找清洁、高效、可再生的能源。
- 面对能源挑战，目前的工程方案可分为三类：一是利用太阳能、风能等可再生能源发电；二是设法使化石燃料成为更清洁的能源，如采取碳捕获和存储等方法；三是发展核能。
- 还有其他战略可以应对气候变化的影响，其中之一就是直接干预地球的气候，即地球工程，这是一个新兴的工程活动领域。但地球工程属于最坏情况下的极端手段，而且会带来不可预测的风险。
- 在应对气候变化和全球变暖方面，工程学将发挥重要作用，但工程学也有其局限性，社会和个人的选择在塑造世界未来方面也发挥着至关重要的作用。

01

1 ．贝特朗·吉勒（Bertrand Gille）在《文艺复兴时期的工程师》（*The Renaissance Engineers* ）一书中这样写道。

2 ．Sunny Auyang，*Engineering – an Endless Frontier* 中引用。

3 ．Sunny Auyang, *Engineering – an Endless Frontier* , p. 3.

4 ．Henry Petroski, *Invention by Design* , p. 2.

5 ．“Who Is Jonathan Ive?” in *Business Week* , 25 September 2006.

02

1 ．奥雅纳公司的芭芭拉·莱恩（Barbara Lane）因其在结构火灾分析方面的工作，于2008年被授予英国皇家工程学院银质奖章。她对双子塔等类似建筑物对火灾的反应进行了研究，此项研究促使她开发出一种高层建筑的设计方法，使建筑物具有更强的防火性能。

2 ．关于水晶宫中使用的方法对设计摩天大楼的重要性，请参阅Henry Petroski, *Invention by Design* 的第10章。

3 ．Victor Smith, *The Sydney Opera House* 中引用。

4 ．“i-Snake”机器人是由伦敦帝国理工学院的一个团队开发的。

03

1 ．美国ANSYS公司开发的FLUENT是工业标准的复杂流体力学软件包，用于进行模拟仿真。

2 ．Dym and Little, *Engineering Design* ：*A Project Based Introduction* , p. 6.

3 ．Adams, *Flying Buttresses, Entropy and O-Rings* , p. 87.

4 ．James Dyson, *Against the Odds: an Autobiography* , p. 7.

5 . Sally Dugan, *Man of Iron* 中引用。

04

1 . Sandy Cairncross: ‘Water and waste: engineering solutions that work’, *Engineering Change: Towards a sustainable future in the developing world* .

2 . 有关穆格合成器的全部情况，请参阅Trevor Pinchand Frank Trocco's *Analog Days: the Invention and Impact of the Moog Synthesiser* 。

3 . Henry Petroski, *Invention by Design* , p. 187.

4 . 关于这类问题的讨论，请参阅约翰·奥尼尔（John O'Neill）、艾伦·霍兰德（Alan Holland）和安德鲁·莱特（Andrew Light）撰写的*Environmental Values* 。

5 . 这两种规范均于2008年8月从该机构的网站上检索得到。美国电气与电子工程师协会的规范于2006年2月获得电气与电子工程师协会董事会的批准。

05

1 . 我不想说，火车站的工作人员有时并不人性化，但越来越常见的情况是，在无人值守的车站，门票只能从自动售票机上购买。

2 . Sandy Cairncross: “Water and waste: engineering solutions that work”, *Engineering Change: Towards a sustainable future in the developing world.*

3 . 2008年约翰·布朗勋爵（Lord Browne of Madingley）在牛津大学详细讲述了这个故事。

4 . 要了解工程师对意识本质的看法，请参阅Igor Aleksander, *The World in My Mind, My Mind in the World: Key Mechanisms of Consciousness in People, Animals and Machines* 。

06

1 . M. Masoon Staneskai and Heather Cruikshank, “Engineering, wealth creation and disaster recovery: the case of Afghanistan”, in *Engineering Change: Towards a sustainable future in the developing world* .

2 . “碳中和”是一个很流行的术语，但它的使用有点迟缓。虽然利用太阳能本身不会产生碳排放，但制造太阳能电池板的过程很可能会产生一些碳排放，风力涡轮机和其他可再生能源发电工具的情况也是如此。

Walter G. Vincenti, 1990: *What Engineers Know and How They Know it—Analytical Studies from Aeronautical History*. Baltimore, Johns Hopkins Press.

Henry Petroski, 2004: *Pushing the Limits—New Adventures in Engineering.* New York, Alfred A. Knopf.

Sunny Y. Auyang, 2004: *Engineering—an Endless Frontier* . Cambridge MA, Harvard University Press.

James L. Adams, 1991: *Flying Buttresses, Entropy and O-Rings: The World of an Engineer.* Cambridge, MA, Harvard University Press.

Aleksander, I. 2007. *The World in My Mind, My Mind in the World: Key Mechanisms of Consciousness in People, Animals and Machines.* Exeter, Imprint Academic

Alvarado, R. V. 2002. *Thomas Edison (Critical Lives series).* Indianapolis, Alpha

ASME International History and Heritage. 1997. *Landmarks in Mechanical Engineering.* Purdue University Press

Ball, P. 1997. *Made to Measure: New materials for the 21st Century.* Princeton, Princeton University Press

Baker, W.J.1970. *A History of the Marconi Company. London, Methuen Batchelor, R. 1994. Hery Ford: Mass Prduction, Modemism and Design.* Manchester, Manchester University Press

Berners-Lee, T. 2003. *Weaving the Web.* London, Texere

Brindle, S. 2005. Brunel: *The Man Who Built the World.* London, Phoenix

Cadbury, D. 1996. *Seven Wonders of the Industrial World.* London, Harper Perennial

Cadbury, D. 2006. *Space Race—The Battle to Rule the Heavens.* London, Harper Perennial

Davis, M. 2004. *Thinking Like an Engineer—Studies in the Ethics of a Profession.* Oxford, Oxford University Press

Dugan, S. 2003. Men of Iron: *Brunel, Stephenson and the inventions that shaped the modem world.* London, Channel 4 Books/MacMillan

Dym, C. L. and Little, P. 2004. *Engineering Design: A Project-Based Introduction.* Chichester, Wiley

Dyson, J. 1997. *Against the Odds: an Autobiography.* London, Orion Business Books

Emmerson, G.S. 1973. *Engineering Education: A Social History.* Newton Abbott, David and Charles

Fagerberg, J., Mowery, D.C., and Nelson, R. R. (eds). 2005. T*he Oxford Handbook of Innovation.* Oxford, Oxford University Press

Ferguson, E.S. 1992. *Engineering and the Mind's Eye.* Cambridge, MIT Press

Gille, B. 1996. *The Renaissance Engineer.* London, Lund Humphries

Gordon, J. E. 1978. *Structures: Or Why Things Don't Fall Down.* London, Penguin

Greaves, W. F. and Carpenter, J. H. 1978. *A Short History of Mechanical Engineering,* 2nd Edition, London, Longman

Guthrie, P., Juma, C. and Sillem, H. 2008: *Engineering Change: Towards a sustainable future in the developing world.* London, The Royal Academy of Engineering

Harvie, D. I. 2004. Eiffel: *The Genius Who Reinvented Himself.* Stroud, Sutton Publishing

Hughes, T. 2004. *Human Made World.* Chicago, University of Chicago Press

Humphreys, K. K. 1999. *What Every Engineer Should Know About Ethics.* New York, Marcel Dekker

Ihde, D. 1993. *Philosophy of Technology, an Introduction.* New York, Paragon House

Israel, P. 1998. *Edison: A life of invention.* New York, Wiley

Jones, P. 2006. *Ove Arup: Master Builder of the Twentieth Century.* Yale, Yale University Press

Luegenbiehl, H. C. 2004. Ethical Autonomy and Engineering in a Cross-Cultural Context', *Techné* , vol. 8

Matthews, C. 1988. *Case Studies in Engineering Design.* London, Arnold

Mitcham, C. 1994. *Thinking Through Technology—The Path Between Engineering and Philosophy.* Chicago, The University of Chicago Press

Morris, P. R. 1990. *A History of the World Semiconductor Industry.* London, Peter Peregrinus

Nakazawa, H. 1994. *Principles of Precision Engineering.* Oxford, Oxford University Press

Parsons, W. B. 1939/1967. *Engineers and Engineering in the Renaissance.* Cambridge, MIT Press

Petroski, H. 1992. To Engineer is Human: *The Role of Failure in Successful Design.* New York, Vintage

Petroski, H. 1996. *Invention by Design—How Engineers get from Thought to Thing.* Cambridge, Harvard University Press

Pinch, T. and Trocco, F. 2002. *Analog Days: the Invention and Impact of the Moog Synthesiser.* Cambridge, Harvard University Press

Pitt, J. C. 2000. Thinking about Technology—Foundations of the Philosophy of Technology. New York, Severn Bridges Press

Pitt, J. C. 2001. "What Engineers Know". *Techné* 5:3, 17-30

Pool, R. 1997. Beyond Engineering: *How Society Shapes Technology.* Oxford, Oxford University Press

Rogers, G. F. C. 1983. *The Nature of Engineering: a Philosophy of Technology.* London, Macmillan

Sample, I. 2007. "Profile: Jonathan Ive", *Guardian* , Friday January 5

Smith, V. 1974. *The Sydney Opera House* . Sydney, Paul Hamlyn

Vise, D. A. 2005. *The Google Story.* London, Pan Books

Watson, G. 1998. *The Civils: The Story of the Institution of Civil Engineers.* London, Thomas Telford

Whitbeck, C. 1998. *Engineering Ethics in Practice and Research.* Cambridge, Cambridge University Press

"Who Is Jonathan Ive? An in-depth look at the man behind Apple's design magic", *Business Week,* September 25, 2006

Common Methodologies for Assessing Risk. 2003. The Royal Academy of Engineering

Creating Systems that Work . 2007. The Royal Academy of Engineering

The Economics and Morality of Safety . 2006. The Royal Academy of

Engineering

Risks Posed by Humans in the Control Loop . 2003. The Royal Academy of Engineering

The Societal Aspects of Risk . 2003. The Royal Academy of Engineering

我感谢英国皇家工程学院的成员和工作人员，他们为这本书带来了很多启发。我尤其要感谢托尼·伊兹（Tony Eades）、布赖恩·多布尔（Brian Doble）、基思·戴维斯（Keith Davis）及团队对我的鼓励。还有以下人员为本书的不同部分提供了有价值的评论，对此我深表感谢，他们是：伊戈尔·亚历山大（Igor Aleksander）、戴维·安德鲁斯（David Andrews）、布赖恩·戴维斯（Brian Davies）、迈克尔·戴维斯（Michael Davis）、克里斯托弗·埃利奥特（Christopher Elliott）、艾伦·福克斯（Allan Fox）、奈杰尔·吉尔伯特（Nigel Gilbert）、戴维·戈德堡（David Goldberg）、达梅·温迪·霍尔（Dame Wendy Hall）、伊恩·霍华德（Ian Howard）、尼克·詹金斯（Nick Jenkins）、克里斯托弗·肯特（Christopher Kent）、邓肯·迈克尔爵士（Sir Duncan Michael）、约翰·蒙克（John Monk）、拉法埃拉·奥科内（Raffaella Ocone）、理查德·普洛塞克（Richard Ploszek）、约翰·罗伯茨（John Roberts）、克里斯托弗·斯诺登（Christopher Snowden）、马丁·托马斯（Martyn Thomas）、约翰·特恩布尔（John Turnbull）、艾伦·沃克（Alan Walker）和约翰·耶茨（John Yates）。

本书献给斯图尔特（Stuart），他深深热爱科学与技术。

未来，属于终身学习者

我这辈子遇到的聪明人（来自各行各业的聪明人）没有不每天阅读的——没有，一个都没有。巴菲特读书之多，我读书之多，可能会让你感到吃惊。孩子们都笑话我。他们觉得我是一本长了两条腿的书。

——查理·芒格

互联网改变了信息连接的方式；指数型技术在迅速颠覆着现有的商业世界；人工智能已经开始抢占人类的工作岗位……

未来，到底需要什么样的人才？

改变命运唯一的策略是你要变成终身学习者。未来世界将不再需要单一的技能型人才，而是需要具备完善的知识结构、极强逻辑思考力和高感知力的复合型人才。优秀的人往往通过阅读建立足够强大的抽象思维能力，获得异于众人的思考和整合能力。未来，将属于终身学习者！而阅读必定和终身学习形影不离。

很多人读书，追求的是干货，寻求的是立刻行之有效的解决方案。其实这是一种留在舒适区的阅读方法。在这个充满不确定性的年代，答案不会简单地出现在书里，因为生活根本就没有标准确切的答案，你也不能期望过去的经验能解决未来的问题。

湛庐阅读App：与最聪明的人共同进化

有人常常把成本支出的焦点放在书价上，把读完一本书当作阅读的终结。其实不然。

时间是读者付出的最大阅读成本

怎么读是读者面临的最大阅读障碍

“读书破万卷”不仅仅在“万”，更重要的是在“破”！

现在，我们构建了全新的 “湛庐阅读”App。它将成为你“破万卷”的新居所。在这里：

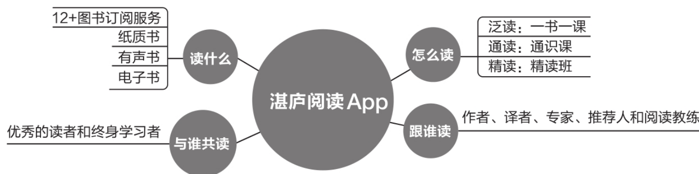
- 不用考虑读什么，你可以便捷找到纸书、有声书和各种声音产品；
- 你可以学会怎么读，你将发现集泛读、通读、精读于一体的阅读解决方案；
- 你会与作者、译者、专家、推荐人和阅读教练相遇，他们是优质思想的发源地；
- 你会与优秀的读者和终身学习者为伍，他们对阅读和学习有着持久的热情和源源不绝的内驱力。

从单一到复合，从知道到精通，从理解到创造，湛庐希望建立一个“与最聪明的人共同进化”的社区，成为人类先进思想交汇的聚集地，与你共同迎接未来。

与此同时，我们希望能够重新定义你的学习场景，让你随时随地收获有内容、有价值的思想，通过阅读实现终身学习。这是我们的使命和价值。

湛庐阅读App玩转指南

湛庐阅读App结构图：



三步玩转湛庐阅读App：



App获取方式：

安卓用户前往各大应用市场、苹果用户前往App Store
直接下载“湛庐阅读”App，与最聪明的人共同进化！

使用App扫一扫功能，
遇见书里书外更大的世界！



快速了解本书内容，
湛庐千册图书一键购买！

大咖优质课、
献声朗读全本一键了解，
为你读书、讲书、拆书！

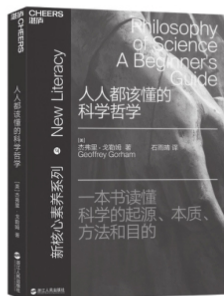
你想知道的彩蛋
和本书更多知识、资讯，
尽在延伸阅读！

延伸阅读

《人人都该懂的科学哲学》

◎ 《人人都该懂的科学哲学》既提供了有关科学的起源和未来，科学的本质、方法和目的的宏大视野，又辅以接地气、大开脑洞的案例，让你从猫咪的惨叫、番茄苗的意外死亡等小小案件中获得有关科学的真知灼见。

◎ 《人人都该懂的科学哲学》给了我们一个重新认识科学、反思自身知识体系的机会。它从没有疑问之处生出疑问，打破了我们对科学抱有的刻板印象。

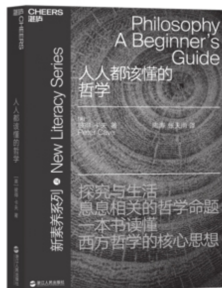




《人人都该懂的哲学》

◎ 《人人都该懂的哲学》选取了10个与我们的生活密切相关的命题，对哲学中的身心问题、个人同一性问题、自由意志问题、怀疑论等核心思想进行了充分翔实的论证。

◎ 如果你的行为导致了他人的伤亡，在什么条件下你不应该受到道德谴责？经过时间的推移，为什么你与10年前的那个你还是同一个人？所有这些哲学根本性问题的答案，你都可以在《人人都该懂的哲学》这本书中找到。





《如何理解建筑》

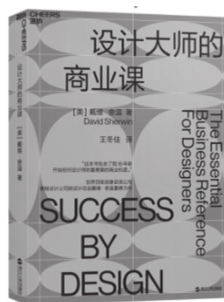
- ◎ 10个角度理解建筑的本质，像建筑师一样体验建筑，轻松从游客进阶到建筑行家，从参观者升级到体验者。
- ◎ 提升审美力，从更高的层次欣赏"明星建筑""网红建筑"。除了能看懂它们，还能真正了解它们的美学和艺术价值。





《设计大师的商业课》

- ◎ 《设计大师的商业课》是一部从商业角度去思考设计和经营设计，深度探讨如何实施设计管理和设计项目的著作，阐释了管理者在经营设计企业、落实设计项目管理的过程中，普遍关注且亟需解决的关键问题，是设计工作者必读佳作！
- ◎ 世界顶级创意咨询公司——青蛙设计公司前设计总监戴维·舍温重磅力作！企业经营16年，商业机密首度公开！掌握经营思维，为设计企业注入商业基因！





(1) 英语中的习惯用语，字面意义为“这不是火箭科学”，意思是“这并非是复杂的事”。——编者注